NOVIEMBRE 2010

INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



BIOLOGIA
Extinción por pérdida de genes

MEDIOAMBIENTE
La Tierra, cada vez más agotada

MEDICINA
Por qué no somos inmortales

COSMOLOGIA
¿Puede terminar el tiempo?

www.investigacionyciencia.es

6,00 EUROS

NUMERO MONOGRAFICO

Fin.

Sobre el final de organismos, sistemas y culturas



SUMARIO

Noviembre de 2010/ Número 410



Mediante el cuidado de los nietos, los mayores desarrollan una importante función social.



Los esqueletos humanos en su estado seco final pueden preservarse durante años.



Las investigaciones sobre el envejecimiento podrían dar lugar a fármacos para la longevidad.

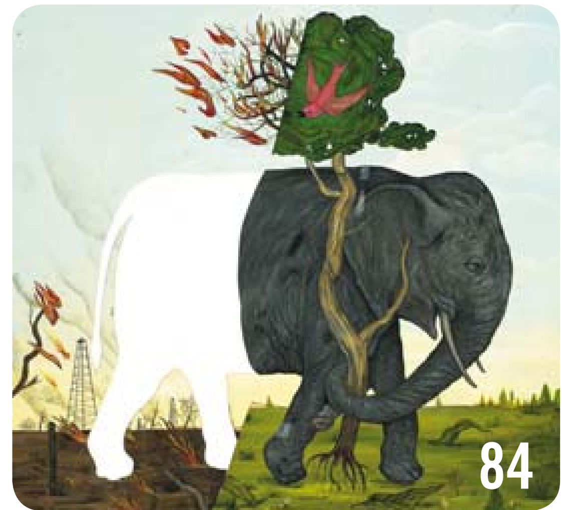


El trasplante de órganos ofrece una segunda oportunidad a una vida en declive.

ARTICULOS



No somos los primeros —ni probablemente seamos los últimos— en creernos al borde de la extinción.



Ciertos cambios convertirán nuestra época en el fin de una era.



Se está intentando perfilar el genoma mínimo necesario para la vida.

SECCIONES

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza
Ernesto Lozano Tellechea
Yvonne Buchholz
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
MANAGING EDITOR, ONLINE Philip M. Yam
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR WRITER Gary Stix
EDITORS Davide Castelvecchi, Mark Fischetti, Christine Gorman, Anna Kuchment, Michael Moyer, George Musser, Kate Wong
CONTRIBUTING EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, John Rennie, Sarah Simpson
ART DIRECTOR, INFORMATION GRAPHICS Jen Christiansen
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
MANAGING DIRECTOR, CONSUMER MARKETING Christian Dorbandt
VICE PRESIDENT AND PUBLISHER Bruce Brandfon

DISTRIBUCION

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid) - Teléfono 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

PUBLICIDAD

Teresa Martí Marco
Muntaner, 339 pral. 1.ª 08021 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Luis Bou: *Fascinación por el fin*, *Trasplantes: entre la vida y la muerte*; Juan Manuel González Mañas: *¿Por qué no somos inmortales?*; Mercè Piqueras: *Y en polvo nos convertiremos*; Carlos Lorenzo: *Los últimos indígenas*; Joandoménec Ros: *Agotamiento de los recursos naturales*; Yago Ascasibar: *¿Puede terminar el tiempo?*, *En busca de la teoría final*; Bruno Moreno: *Apuntes*; Marián Beltrán: *Desarrollo sostenible*, *Encontrar el equilibrio*; J. Vilardell: *Hace...*, *Curiosidades de la física*



SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euros	120,00 euros
Resto del mundo	100,00 euros	190,00 euros

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

Difusión controlada

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Printer Industria Gráfica Ctra. N-II, km 600 - 08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España



Infierno nuclear

En "Repercusión planetaria de una guerra nuclear regional" (marzo 2010), Alain Robock y Owen Brian Toon sostienen que un intercambio entre India y Pakistán de 100 bombas nucleares del tamaño de la arrojada sobre Hiroshima desencadenaría una catástrofe mundial por las partículas de humo elevadas a la estratosfera. ¿Cómo hacer esto compatible con las enormes masas de humo arrojadas a la atmósfera terrestre durante la Segunda Guerra Mundial?

Cerca del final de la guerra, fueron bombardeadas más de 60 ciudades japonesas. Otras zonas a considerar son, desde luego, las ciudades británicas, alemanas y rusas incendiadas y destruidas a lo largo de la contienda, además de los bombardeos particularmente "sucios" como el de las refinerías de crudo en Ploesti, Rumania, y las numerosas batallas importantes. En mi opinión, los autores han sobrevalorado el daño global infligido por una guerra del tipo que describen. Quizá no hayan considerado con suficiente atención los deterioros ambientales ocasionados durante la Segunda Guerra Mundial.

Kevin A. Capps
Corona del Mar, Calif., EE.UU.

RESPONDEN LOS AUTORES: *Por supuesto, se produjeron numerosos incendios en Japón y en Europa durante la Segunda Guerra Mundial, varios de ellos hacia el final de la misma.*

La base de datos formada por observaciones del conflicto bélico no permite saber si el humo de tales incendios llegó a la estratosfera. En el escenario descrito por Capps, ardieron durante cuatro semanas 155 kilómetros cuadrados de áreas urbanas en Japón. A menos que cada incendio fuese de intensidad suficiente para provocar una tormenta ígnea, el humo no habría sido impulsado a la estratosfera y se habría quedado en la troposfera, como sucedió con el humo de los incendios de la Guerra del Golfo en 1991. Ello significa que el humo persistiría en la atmósfera alrededor de una semana solamente, con efectos localizados y de breve duración. Aunque todo el humo hubiera llegado a la estratosfera, la profundidad óptica habría sido muy inferior a la originada en el conflicto nuclear regional que analizábamos: allí se consideraba un área incendiada de 1300 km^2*. El número de grandes tormentas ígneas en la Segunda Guerra Mundial fue mucho menor que las 100 de nuestro estudio.*

Nuestro modelo sugiere que el pequeño número de tales eventos en la Segunda Guerra Mundial no habría producido efectos climáticos que hayan podido detectarse sobre el fondo de la climatología natural y sus variaciones. Por no haberlo estudiado nadie, desconocemos si el humo generado en esa gran contienda tuvo algún pequeño efecto sobre el clima. La Segunda Guerra Mundial no invalida, pues, nuestros resultados. De hecho, el desgraciado ejemplo de las ciudades incendiadas respalda nuestra teoría de que un bombardeo nuclear irá seguido por grandes tormentas ígneas. Los estudios más recientes de los grandes incendios forestales, como los de Australia durante enero de 2003, demuestran que el humo puede ser inyectado en la baja estratosfera y desde allí ser elevado a mayores alturas por acción de la luz solar.

Oscura y fría

Sorprende que el artículo "Formación estelar" de Erick T. Young (abril 2010), donde se analiza la formación de las estrellas masivas, no mencione la función que puede desempeñar la materia oscura o las teorías alternativas de la dinámica newtoniana modificada (MOND, por sus siglas en inglés). La gravedad newtoniana basada puramente en masas de materia bariónica es insuficiente para describir la física de las galaxias. Una mayor atracción gravitatoria como la provocada por la materia oscura o la MOND podría ser relevante en la formación de las estrellas masivas. ¿Por qué en este artículo no se han tenido en cuenta tan importantes efectos?

Robert Olshansky
Wayland, Mass. (EE.UU.)

RESPONDE YOUNG: *La materia oscura fría (CDM, en inglés) se ha convertido en una componente importante de las teorías cosmológicas actuales. La prueba de la CDM se basa en observaciones de las curvas de rotación de las galaxias y de las estructuras que se aprecian a escala galáctica y a otras todavía mayores (más de 100.000 años luz, por ejemplo). Para las acumulaciones contempladas a menores escalas no parece ser necesaria la CDM. En los procesos de formación estelar que examina el artículo, consideramos sólo distancias de un año luz, como mucho. A estas escalas parece que la materia ordinaria explica suficientemente bien la dinámica y el equilibrio energético de las estructuras que vemos. Además, al ser débil su interacción con la radiación electromagnética, la materia oscura fría no puede radiar su energía con eficacia: precisamente esta radiación y el consiguiente enfriamiento es lo que rompe el equilibrio en favor de la gravedad para formar estrellas.*



LAS NUBES INTESTELARES se colapsan en estrellas, sobre todo por la atracción gravitatoria que la materia que contienen ejerce sobre sí misma. La materia oscura no se acumula en las estrellas, sino que las atraviesa conforme orbita la galaxia.

CORTESIA DE THE GLIMPSE TEAM/UNIVERSIDAD DE WISCONSIN, MADISON

Erratum corrige

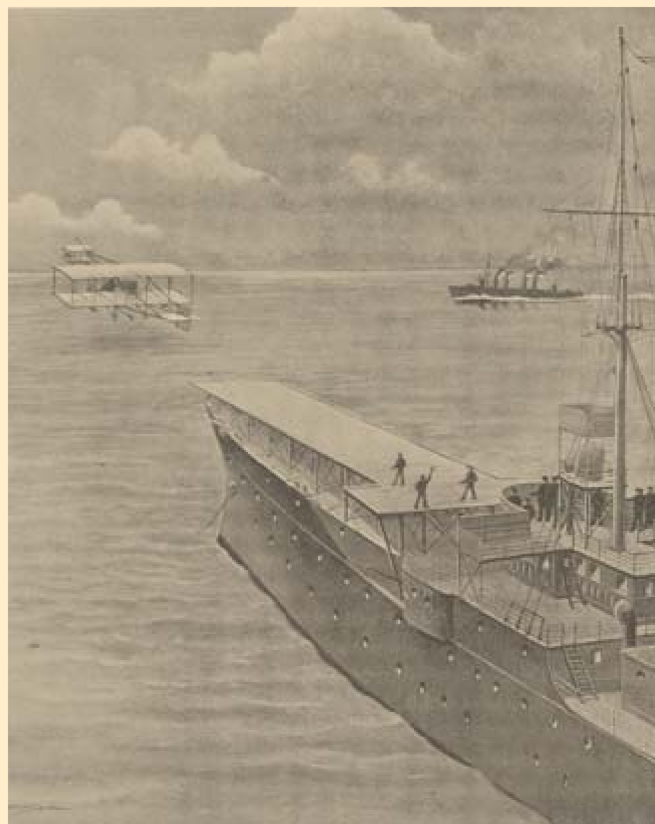
Como apunta nuestro lector Juan Paricio Cardona, en el artículo "Exoplanetas habitables", del pasado mes de octubre, los rótulos de los ejes del gráfico que se muestra en la pág. 20 son incorrectos. En el eje de ordenadas debería leerse "Radio (en radios jovianos)" y en el de abscisas, "Masa (en masas jovianas)".

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

...cincuenta años

Transformación drástica. «Una desastrosa experiencia ha demostrado cuán frágiles y proclives a la destrucción son los hábitats africanos. Es bien conocido el enorme fracaso del plan de cultivo extensivo de cacahuetes en Tanganica, una quimera megalómana que pasó por alto las características más elementales de los suelos africanos. Allá donde se sustituye la vegetación de la gran meseta africana por plantas de cultivo, muchas tierras se tornan duras como piedras o se erosionan y pierden carga cinegética. Los datos respaldan una conclusión contundente. Sólo bajo las comunidades naturales de animales de caza se mantiene una elevada captación y reciclado de energía solar. Esa conclusión exige una gestión de la cabaña salvaje orientada a la producción de alimentos proteínicos.»

El origen de la fibra óptica. «Recientemente, un tipo especial de conductores de luz ha dejado de ser una curiosidad trivial para convertirse en un importante dispositivo óptico. Está constituido el mismo por manojos de fibras de vidrio muy finas y, por tanto, muy flexibles, habitualmente revestidos por una capa de un vidrio de otra clase. Tales manojos no sólo transportan una imagen óptica a lo largo de un trayecto sinuoso, sino que también la transforman de diversas maneras aprovechables. Conforme avance la tecnología, no cabe duda de que la óptica de fibras hallará una aplicación más amplia en distintos campos de la investigación y de la ingeniería. —Narinder S. Kapany»



PRIMER VUELO desde un buque de la armada estadounidense: Eugene Ely alza el vuelo hacia la historia, 1910.

...cien años

El primer piloto de la Armada. «Para este primer intento de volar desde la cubierta de un buque hasta un punto prefijado en tierra se recabaron los servicios de Eugene Ely y su biplano Curtiss. Tal como muestra la ilustración, sobre la proa del 'Birmingham' se levantó una plataforma. Pese a las rachas de aire y lluvia, Ely decidió intentar el vuelo. Entre dos turbiones, puso en marcha la máquina. Cuando ésta despegó de la plataforma enseguida se estabilizó, hasta que golpeó contra el agua con una gran salpicadura, señal que los espectadores entendieron como el final del vuelo. Pero, en cambio, la máquina volvió a elevarse y siguió su camino. Se dirigió directamente hasta el punto de tierra más cercano sobre el que descendió sin contratiempos.»

Células en crecimiento. «El doctor Alexis Carrel y su ayudante del Instituto Rockefeller, el doctor Montrose T. Burrows, han señalado con toda lógica que la misión de la ciencia es desarrollar métodos que permitan descubrir las leyes de la fisiología. Ambos investigadores han iniciado la investigación sistemática de uno de tales métodos, en concreto el cultivo de tejidos adultos fuera del cuerpo del que proceden. Sus experimentos han puesto de manifiesto que los tejidos y los órganos adultos se desarrollan con gran facilidad fuera del cuerpo. Carrel y Burrows, tan rigurosos y cautelosos en su trabajo, se atreven a afirmar, con la información de que se dispone, que el perfeccionamiento del método de cultivo de tejidos adultos de mamíferos contribuirá al estudio de campos desconocidos de la patología humana, donde la investigación promete los mejores y más trascendentes frutos para la existencia humana.»

...ciento cincuenta años

Progreso brasileño. «Informa un corresponsal del *Philadelphia Ledger* que el Ferrocarril de Don Pedro progresa favorablemente a manos de los ingenieros estadounidenses comprometidos en su construcción. El emperador Pedro II de Brasil, firme partidario del progreso de las artes y las ciencias, ha visitado hace poco el trazado asistido por una comitiva que marchó a caballo por uno de los túneles. El emperador bajó por varios pozos, decidido a inspeccionar de cerca esta gigantesca empresa. Al descender por el pozo principal del gran túnel, se eligió al comandante Ellison para que se sentara frente a Su Majestad, al ser de talla y peso casi iguales. Los ministros presentes se esforzaron para disuadirlo de su intento, pero dado que halló convenientes las disposiciones de seguridad, decidió satisfacer su propia curiosidad y servir de ejemplo. Desde la visita de Su Majestad al trazado, ha cesado toda oposición a la apertura de los túneles. El trayecto cubrirá desde Río de Janeiro hasta el río Parahiba.»

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CIII, N.º 22; 26 DE NOVIEMBRE DE 1910

CAMBIO DE HORA

¿Ahorra energía el horario de verano?

El principal argumento a favor de la introducción de un horario de verano ha sido siempre el ahorro energético: al disfrutar de más tiempo de luz solar por la tarde, se reduce el uso de la iluminación artificial. Alemania instituyó la *Sommerzeit* ("horario de verano") como forma de ahorrar carbón en tiempos de guerra. En 1918, Europa, Rusia y EE.UU. habían seguido su ejemplo. Los relojes volvieron a la normalidad cuando llegó la paz y así continuaron hasta la Segunda Guerra Mundial, cuando el horario de verano volvió a instaurarse de forma temporal. La primera puesta en práctica del cambio de hora en tiempos de paz llegó en 1966, año en que se implantó en algunos estados de EE.UU. Desde entonces, las crisis energéticas, como la del petróleo de los años setenta, han convertido el horario de verano en una práctica habitual.

Sin embargo, no parece claro que en nuestra época de aires acondicionados la estrategia sirva aún para ahorrar energía. Un estudio reciente aparecido en el *Journal of Economics and Statistics* analizó los patrones de consumo eléctrico en Indiana, estado en el que hasta 2006 algunas regiones adoptaban el cambio de hora y otras no. El resultado fue que las regiones con horario de verano consumían más electricidad que aquellas que no lo hacían. Los autores atribuyeron el fenómeno a un mayor uso de ventiladores y aires acondicionados durante las prolongadas tardes de verano.

Otros estudios han apuntado que el cambio de horario podría provocar más accidentes de tráfico (al alterar los ritmos biológicos y privar del sueño), depresión (un estudio de 2008 mostró que los varones exhibían mayor tendencia al suicidio durante las semanas posteriores a un cambio de horario) e incluso un mayor riesgo de ataques al corazón (según un estudio sueco, su incidencia aumenta bruscamente entre el 5 y el 10 por ciento durante la primera semana tras el adelanto de hora).

—*John Pavlus*





DONAR UN RIÑON parece que no acorta la vida.

EVA HEDLING *Aurora Photos (reloj)*; MICHELLE DEL GUERCIO *Photo Researchers, Inc. (riñón)*

TRASPLANTES

Con un riñón basta

Cada treinta minutos, toda la sangre de nuestro organismo se filtra a través de los riñones. Sin embargo, la diabetes puede hacer que estos órganos del tamaño de un puño dejen de funcionar, lo que provoca una acumulación de sustancias en la sangre que resultaría letal si no se recurre a diálisis o a un transplante de riñón.

En los EE.UU., al menos seis mil personas sanas donan cada año un riñón a alguien que conocen; unas cien más se ofrecen para dar de forma anónima sus glomérulos (las unidades básicas de filtración del riñón). Si bien es cierto que para vivir se necesita sólo un riñón, la operación necesaria para retirar el otro y el riesgo de sufrir posteriormente una enfermedad en el único que queda dificultan la decisión de donar.

Dorry Sergev, cirujano especializado en transplantes de la Escuela de Medicina de la Universidad Johns Hopkins, estudió la mortalidad de 80.000 donantes de riñón durante los últimos quince años, comparándolos con personas sanas que tenían ambos riñones. El estudio, publicado en el *Journal of the American Medical Association* el 10 de marzo, en el sexagésimo aniversario del primer transplante de riñón en los EE.UU., no encontró ningún aumento en la mortalidad entre los donantes, una vez recuperados de la operación.

Aunque los donantes se seleccionan de forma rigurosa antes del procedimiento, Segev subraya que hay riesgos: "Sigue siendo una operación importante. Vives con un solo riñón. La gente tiene que pensárselo bien y ser consciente de los riesgos, antes de emprender esta acción heroica".

—*Katie Moisse*



CONTAMINACION

Combustibles tóxicos

Los navíos de carga emplean como combustible una de las sustancias más dañinas que existen: el combustible búnker, un derivado del petróleo muy barato y de ínfima calidad. Presenta un elevado contenido de azufre, un elemento muy nocivo puesto que forma dióxido de azufre, causante de la lluvia ácida y de numerosas enfermedades respiratorias. Es por ello que, en el caso del combustible diésel ordinario, la UE impone un límite al contenido en azufre de 50 partes por millón. No así al combustible búnker: su variedad más contaminante, la que queman los barcos en alta mar, contiene un 4,5 por ciento en peso de azufre. Se calcula que el combustible para barcos provoca la muerte prematura de unas 90.000 personas al año.

El pasado mes de julio la Organización Marítima Internacional comenzó a aplicar controles más estrictos a lo que hasta ahora venía siendo el combustible líquido menos regulado del mundo. En una primera fase, el actual máximo legal de 1,5 por ciento de azufre en el combustible quemado cerca de la costa se reducirá al 1 por ciento. En 2020 se requerirá que la totalidad del combustible para barcos no presente cantidades de azufre superiores al 0,5 por ciento, un cambio que reduciría a la mitad el número de muertes derivadas de su uso.

Tales regulaciones suponen un buen comienzo. Sin embargo, no afrontan un problema potencialmente más grave: la contribución al calentamiento global. Si la flota internacional de cargueros fuera un país, sería el sexto mayor emisor de gases de efecto invernadero, inmediatamente detrás Japón y por delante de Alemania.

—*Christopher Mims*



ENERGIAS RENOVABLES

Molinos de viento en el mar

El problema de la energía eólica es que no siempre sopla viento. Sin embargo, quizás exista una forma de garantizar vientos constantes, al menos en ciertas regiones: instalar molinos en el mar y conectarlos entre sí.

Willett Kempton, director del Centro para Energías sin Emisiones de Carbono de la Universidad de Delaware, y sus colaboradores analizaron el viento en once lugares de la costa este de EE.UU. Calcularon que, si se instalasen molinos algunos kilómetros mar adentro a lo largo de los 2500 kilómetros de costa y se conectasen entre sí, podría garantizarse un suministro eléctrico constante. Según su modelo, el viento no dejaría de generar electricidad en ningún momento. Investigaciones previas realizadas por Kempton ya habían demostrado que el potencial eólico de las inmediaciones de la costa bastaría para satisfacer las necesidades energéticas de las ciudades del litoral.

Actualmente no existen molinos instalados en ningún lugar de las aguas territoriales de EE.UU. Otra particularidad reside en la gran cantidad de cable necesario para conectar las hipotéticas centrales eólicas: el cable de alta tensión y corriente continua más largo que se ha colocado hasta el momento no supera los 580 kilómetros. Los investigadores estiman que el coste del cableado para el proyecto ascendería a 1400 millones de dólares, un quince por ciento del coste de las once hipotéticas centrales eólicas. Su análisis aparece en el número del 5 de abril de *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*.

— *David Biello*

TURBINAS EOLICAS MARINAS como éstas, emplazadas en la bahía de Liverpool, proporcionarían un suministro constante a las ciudades de la costa este de EE.UU.

SEGURIDAD VIAL

Vehículos sin conductor

Tras la retirada del mercado de modelos Toyota el pasado mes de enero, la idea de ceder al *software* el control de nuestros vehículos puede parecer absurda. Sin embargo, según múltiples estudios realizados a lo largo de los últimos 25 años, los factores humanos como las distracciones, el consumo de alcohol o estupefacientes, o simplemente las malas decisiones constituyen la primera causa de accidentes de tráfico. Se antoja razonable pensar que, cuanto antes soltemos los humanos el volante, más seguras serán nuestras carreteras.

Pero ¿constituye una conducción totalmente automatizada un objetivo realista? Según David Shinar, del Laboratorio de Seguridad de Factores Humanos de la Universidad Ben-Gurion del Neguev, en Israel, si bien puede que los conductores humanos nunca sean reemplazados totalmente, nuestra función podría cambiar. Estamos pasando de una situación en la que el conductor controla el sistema a otra en la que tan sólo lo monitorizará, como hace el piloto en un avión. Incluso cuando el piloto automático está en marcha, un piloto nunca abandona la cabina. Lo que podemos esperar son vehículos que requieran un control menos directo por parte del conductor, quien sólo intervendría cuando sucediese algo inesperado.

Sistemas ya en uso, como el control electrónico de estabilidad, que detecta y previene derrapes, podrían combinarse con técnicas más modernas, como dispositivos que mantengan al vehículo dentro de una "burbuja de seguridad" en torno al coche. Ello permitiría una trayectoria estable y reduciría al mínimo las intervenciones del conductor. En 2007, un modelo sin conductor de Chevy Tahoe, apodado *Boss* ("Jefe"), recorrió con éxito un complicado itinerario que incluía tráfico realista e incluso atascos. Quizá los vehículos autónomos lleguen antes de lo que pensábamos.

—John Pavlus

SISTEMA SOLAR

Asteroides con agua

Por primera vez se ha descubierto un asteroide que contiene hielo y compuestos orgánicos en su superficie. Hasta ahora, tales características se habían asociado a los cometas, provenientes de lugares muy fríos y distantes de nuestro sistema solar. Sin embargo, el asteroide en cuestión, conocido como 24 Themis y de unos 200 kilómetros de anchura, se halla entre Marte y Jupiter. El hallazgo apoya la teoría de que, en épocas remotas, los asteroides podrían haber proporcionado a la Tierra agua y algunos de los compuestos prebióticos que permitieron que se desarrollara la vida.

Los hallazgos sobre 24 Themis han sido referidos por dos equipos de investigadores en la revista *Nature*. Una particularidad de este asteroide radica en que ocupa una órbita similar a la de los recién descubiertos "cometas del cinturón principal": cuerpos presentes en el cinturón de asteroides pero con colas similares a las de los cometas, probablemente generadas por la sublimación de hielo. Tales cometas y 24 Themis parecen compartir el mismo origen.

—John Matson



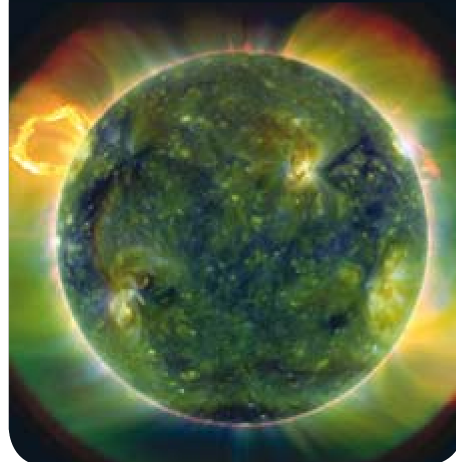
EL ASTEROIDE 24 THEMIS parece contener hielo. Esta representación artística muestra al asteroide junto a dos cuerpos más pequeños, uno de los cuales es un cometa que orbita en el cinturón de asteroides entre Marte y Júpiter.

ASTRONOMIA

Un regalo para la ciencia solar

Un nuevo satélite, el Observatorio de la Dinámica Solar (SDO), lanzado en febrero por la NASA, podría suponer una revolución para la física solar. Transmite de manera casi ininterrumpida imágenes de 16 megapíxeles, separa las emisiones solares en sus longitudes de onda individuales, rastrea la propagación de ondas por la superficie del Sol y cartografía su campo magnético. La fotografía que reproducimos aquí es una imagen ultravioleta del Sol tomada el 30 de marzo. Los falsos colores muestran las distintas temperaturas del gas: los rojos muestran zonas frías (unos 60.000 grados), mientras que los azules y verdes corresponden a temperaturas mayores (de al menos un millón de grados).

—John Matson



BRUCE BENEDICT *Corbis (conductor)*; SAM SLOAN *Alamy (mancha de aceite)*; *Getty Images (turbinas)*; GABRIEL PEREZ *Servicio Multimedia, Instituto de Astrofísica de Canarias, Tenerife (asteroide)*; CORTESIA DEL OBSERVATORIO DE DINAMICA SOLAR/ATMOSPHERIC IMAGING ASSEMBLY/NASA *(sol)*;

En busca de la teoría final

Una idea de los años sesenta podría proporcionar la clave para unificar la gravedad y la física de partículas

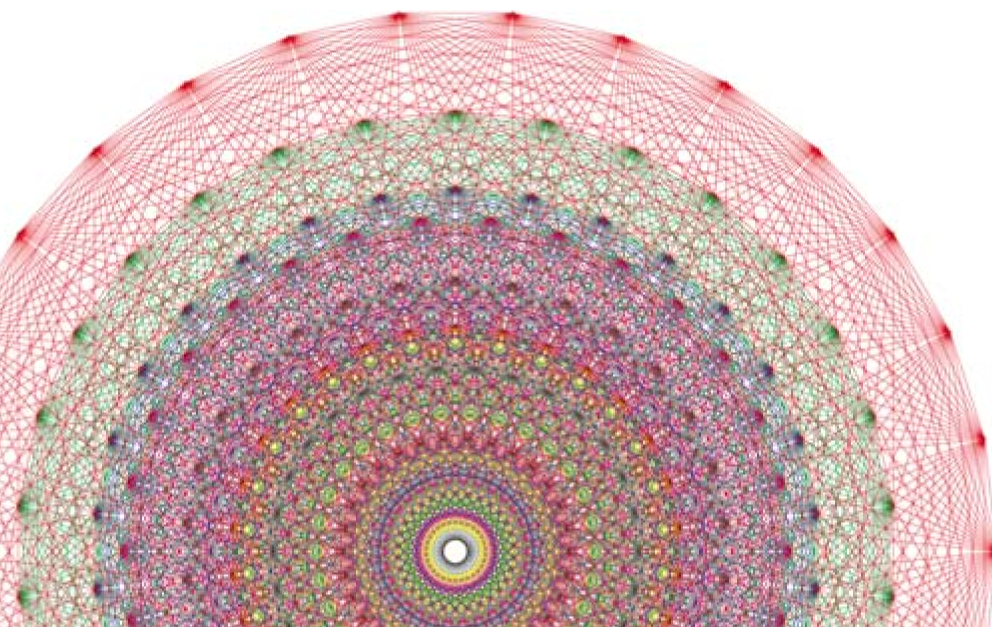
Puede que algunas ideas que datan de hace medio siglo permitan resolver uno de los mayores misterios de la física: cómo formular una teoría única que describa la gravedad y la física de partículas. Esa es la esperanza de algunos expertos que abogan por recuperar un enfoque basado en primeros principios.

Durante el pasado mes de julio, un grupo de matemáticos y físicos se reunió en la Estación Internacional de Investigación Banff, en Alberta, para discutir un retorno a la edad de oro de la física de partículas. En la década de los sesenta, Murray Gell-Mann descubrió que las masas, cargas y otras propiedades de las partículas elementales se organizaban en patrones fijos dados por ciertas estructuras matemáticas denominadas grupos de Lie. En particular, Gell-Mann halló una correspondencia entre las propiedades de cierto grupo de partículas y el grupo de Lie *SU*(3). Pero su propuesta dejaba al descubierto una plaza vacante: para que la relación fuese exacta, debía existir una nueva partícula ("Omega-menos") que aún nadie había visto. Cuando, poco tiempo después, la misma fue descubierta, el acontecimiento supuso un espaldarazo a la clasificación de partículas elementales en términos de grupos de Lie.

Durante las décadas siguientes esa estrategia ayudó a sentar las bases de lo que hoy es el modelo estándar de la física de partículas. Este se basa en una combinación de tres grupos de Lie (*SU*(3) × *SU*(2) × *U*(1)), la cual se corresponde con todas las partículas elementales conocidas y tres de las fuerzas fundamentales: el electromagnetismo, la fuerza nuclear fuerte y la fuerza débil. Por aquel entonces parecía que hallar un único grupo de Lie que describiese todas las interacciones, incluida la gravedad, sería una cuestión de tiempo. Pero tal estrategia fracasó: todos los intentos exhibían inconsistencias matemáticas o predecían fenómenos no observados en la naturaleza, como la desintegración del protón.

Durante los años ochenta, y conforme surgían otros candidatos a la unificación, como la teoría de cuerdas, la idea cayó en desuso. Hace poco, sin embargo, algunos expertos han vuelto a dirigir sus esfuerzos hacia los grupos de Lie. Roberto Percacci, del Instituto de Estudios Avanzados de Trieste, presentó en el congreso de Banff un nuevo modelo, desarrollado en colaboración con Fabrizio Nesti, de la Universidad de Ferrara, en el que la gravedad queda descrita por un gran grupo de Lie: *SO*(11,3). Este también incluye a los electrones, quarks, neutrinos y el resto de los fermiones. Aunque el modelo no explica el comportamiento de los fotones ni el resto de las partículas mediadoras de las interacciones (bosones), Percacci cree que se trata de un primer paso importante.

REPRESENTACION VISUAL del grupo de Lie E_8. Estas complejas estructuras matemáticas quizás escondan una descripción unificada de las partículas y sus interacciones.



CORTESIA DE JOHN STEMBRIDGE Y PETER McMULLEN

Un acólito del trabajo de Percacci es A. Garrett Lisi, investigador independiente y doctor en física por la Universidad de California en San Diego. Lisi fue noticia en 2007 gracias a su intento de integrar una "teoría del todo" en E_8, el grupo de Lie más complejo y elegante. Sus ideas reavivaron el interés de algunos matemáticos hacia este enfoque histórico, lo que, según Gregg J. Zuckerman, experto en el grupo E_8 de la Universidad de Yale, condujo a la reunión de Banff.

Otros expertos han explotado la idea de diversas maneras. En lugar de interpretar los grupos de Lie como "cajas" que contienen las fuerzas y las partículas, Tevian Dray y Corinne Manogue, de la Universidad estatal de Oregón, se dedican a descomponerlos y examinar uno de sus constituyentes matemáticos fundamentales: un conjunto de números de ocho dimensiones llamados octoniones (los números reales son unidimensionales, mientras que los números complejos, compuestos de una parte real y otra imaginaria, poseen dos dimensiones).

Los octoniones no obedecen las leyes habituales del álgebra; por ejemplo, el orden en que se realiza el producto de dos octoniones sí altera el producto. Pero Dray y Manogue han empleado esa falta de simetría para describir las propiedades de algunas partículas. Entre otras propiedades, los octoniones reproducen de forma natural la inusual "zurdera" de los neutrinos, la preferencia de su espín a alinearse en un sentido determinado con respecto a su momento.

Los octoniones también parecen hechos a medida para realizar cálculos en 10 dimensiones. Ello los hace potencialmente útiles en la teoría de cuerdas, la cual predice un universo de diez dimensiones: las cuatro habituales más seis di-

mensiones compactas. Hasta ahora, los teóricos de cuerdas no han conseguido identificar un único mecanismo que describa la estructura de ese espacio compacto. Pero Dray y Manogue han descubierto que, en ciertos casos, los octoniones permiten llevar a cabo tal hazaña de manera sencilla y automática.

"Empezamos a vislumbrar las propiedades que debe poseer una teoría final", afirma Dray, al tiempo que hace hincapié en que todavía queda mucho trabajo por hacer hasta obtener un modelo de octoniones que funcione completamente. Lo que resulta alentador, prosigue, son los indicios que sugieren que el enfoque basado en grupos de Lie representa el camino a seguir. Los últimos avances han estimulado a matemáticos como Jeffrey Adams, de la Universidad de Maryland: "Me sentiría decepcionado si no hubiese algo en esta dirección que funcionase", afirma.

No todo el mundo comparte ese optimismo. Skip Garibaldi, matemático de la Universidad de Emory, sostiene que la línea de investigación basada en el grupo E_8 es errónea. Junto con Jacques Distler, de la Universidad de Texas en Austin, Garibaldi ha demostrado que la teoría de Lisi predice la existencia de nuevas partículas no deseadas cuyos efectos ya deberíamos haber visto.

Lisi, que el pasado junio publicó la última versión de su trabajo en Internet, reconoce esos problemas. Pero añade que la teoría basada en E_8 constituye un trabajo en curso y que dichas partículas "extra" habrían evadido su detección si fueran más pesadas de lo que se cree. De hecho, afirma, quizá se observen en el Gran Colisionador de Hadrones del CERN.

Zeeya Merali

¿Por qué nos mareamos?

La causa podría hallarse en un control postural deficiente

Para evitar posibles escenas desagradables, a los estudiantes se les prohíbe comer durante las cuatro horas anteriores al experimento. Una vez en la sala, se suben a una plataforma y fijan la mirada en un mapa de EE.UU. Entonces las paredes comienzan a desplazarse hacia delante y hacia atrás, apenas 1,8 centímetros en cada ciclo. Pero, para ciertas frecuencias, el movimiento provoca una sensación de tirón que comienza en alguna parte del cerebro y que, de manera misteriosa, acaba llegando al estómago. Antes de que se manifiesten los efectos del mareo, los sujetos suelen pedir clemencia.

Llegados a ese punto, muchos estudiantes pensarán que el crédito que recibirán por participar en la "casa de los horrores" sensorial de Thomas Stoffregen quizá no valga la pena. Sin embargo, para este psicólogo de la Universidad de Minnesota, cada alumno representa un dato más que, en su opinión, ayudará a invalidar el dogma sobre la causa de la cinetosis, el mareo característico de los viajes en barco, avión o autobús. Si está en lo cierto, sus conclusiones mostrarán nuevas maneras de identificar a las personas propensas al mareo antes de que aparezcan las náuseas. Y puede que proporcione a los diseñadores de simuladores o videojuegos métodos para que potenciales jugadores sensibles a los mareos continúen al control de los mandos.

Durante el pasado siglo, se creía que la cinetosis derivaba de un conflicto entre nuestros sentidos. Los oídos internos poseen sensores para el movimiento angular (canales semicirculares) y para el movimiento lineal (otolitos). Cuando la información proveniente de los mismos no coincide con la que esperamos recibir de nuestros ojos y músculos, se produce el mareo por movimiento. Aun así, nuestros sentidos proporcionan de manera constante diferentes canales de información: la redundancia es un elemento clave del sistema sensorial, y el cerebro no compara nuestros sentidos de una manera directa. Además, dado que resulta imposible determinar cuál de los sentidos en conflicto el cerebro interpreta como "equivocado", Stoffregen ha otorgado a la teoría del conflicto la peor calificación que un científico puede encontrar: no falsable.

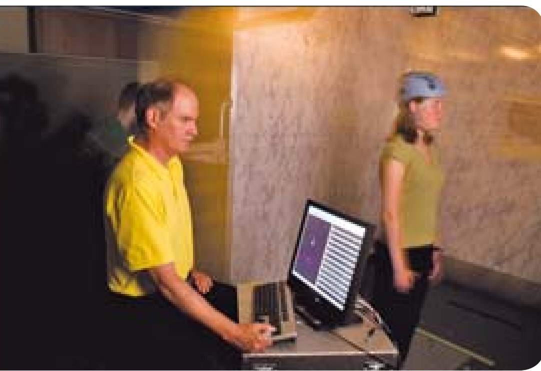


1. EL MAREO por movimiento podría deberse a la inestabilidad postural, no a un conflicto sensorial.

DAVID SACKS Getty Images

De hecho, los expertos llevan largo tiempo preguntándose por qué algunas personas y ciertos tipos de individuos, como mujeres embarazadas o niños, se muestran más susceptibles que otros a sufrir mareos. Además, los experimentos realizados desde los albores de la era espacial, cuando la NASA buscaba evitar que los astronautas enfermasen, sólo predicen con acierto quién sucumbirá al mareo por movimiento en un 30 por ciento de las ocasiones. Por último, Stoffregen apunta la intrigante observación de que, mientras que la gente se marea en la cubierta de un barco, casi nadie siente ganas de vomitar cuando se sumerge en el agua.

Stoffregen argumenta que el mareo por movimiento tiene su origen en la persistente incapacidad del cerebro para modular los movimientos del cuerpo en circunstancias difíciles. La inestabilidad postural (la incapacidad para mantener el equilibrio) se consideraba un síntoma de mareo por movimiento. Stoffregen lo niega: si bien el control postural se basa en la retroalimentación sensorial, el mareo por movimiento constituye, en realidad, un síntoma de que el sistema de control motor se está desbaratando.



2. LOS INVESTIGADORES mueven las paredes de un lado a otro para inducir mareo en el voluntario.

Su teoría alternativa, publicada por primera vez en 1991, tuvo poca repercusión. Sus artículos cosechan sólo un modesto número de citas cada año. Pero los expertos siempre han comentado las ideas de Stoffregen y, últimamente, algunos han comenzado a aceptarlas.

La creciente aceptación de esa teoría tiene mucho que ver con los experimentos llevados a cabo durante las dos últimas décadas. Stoffregen ha descubierto que, en la habitación en movimiento, los voluntarios pueden reducir significativamente el mareo con sólo extender su postura; un hecho que, según afirma, la teoría del conflicto sensorial no prevé. Los estudiantes que se encuentran de pie y con sus pies separados cinco centímetros tienden a marearse un 60 por ciento de las veces. Separar las piernas 30 centímetros aumenta la estabilidad de la cabeza y el torso, y reduce la incidencia de los mareos al 20 por ciento. Stoffregen asegura que, al monitorizar el balanceo del cuerpo, resulta posible predecir la aparición del mareo con una precisión del 60 por ciento. Si el balanceo fuera un síntoma del mareo, sólo se detectaría después de que los participantes declararan sentir náuseas.

Pero la prueba definitiva de la teoría aún se encuentra en proceso. Cuando el cuerpo flota en el agua, se torna estable y el control postural no importa. Si Stoffregen tiene razón, en una situación así el mareo por movimiento sería imposible incluso en las condiciones más extremas. Stoffregen sólo tiene que convencer a la NASA para que le permita utilizar el Laboratorio de Flotación Neutral del Centro Espacial Johnson, en Houston. Desafortunadamente, las aplicaciones prácticas de su investigación serían, como mucho, indirectas. "La inmersión en agua constituiría un método infalible para prevenir el mareo por movimiento en un vuelo orbital", afirma. "Lamentablemente, una nave espacial llena de agua pesaría tanto que su lanzamiento resultaría demasiado caro". En cualquier caso, siempre nos quedará la Biodramina.

Brendan Borrell

Migraciones prehistóricas en Iberia

Cronología de la ocupación humana antigua del sureste ibérico. Hacia un nuevo paradigma

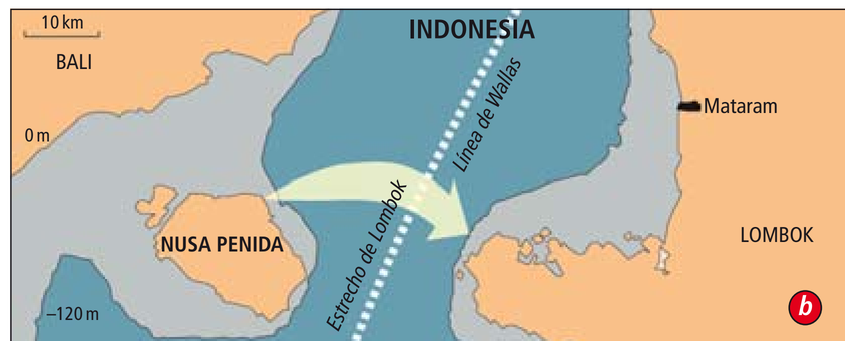
El estudio de la evolución humana guarda una estrecha relación con la geocronología. Conocer con precisión las edades de fósiles humanos o restos arqueológicos resulta fundamental para proponer árboles filogenéticos o modelos de dispersión.

La historia abunda en ejemplos de dataciones que han supuesto un cambio de paradigma. A los fósiles de Java se les atribuía una antigüedad de un millón de años (Ma), hasta que en 1994 Carl Swisher, del Centro de Geocronología de Berkeley, California, publicó edades radiométricas de más de 1,6 Ma. Estos resultados envejecieron considerablemente la salida del hombre de Africa y su dispersión en Asia. Pero ¿cuándo se colonizó Europa? Estudios recientes indican que el sureste de la península Ibérica constituye una región clave para resolver esta cuestión.

Las primeras ocupaciones y la industria olduvayense

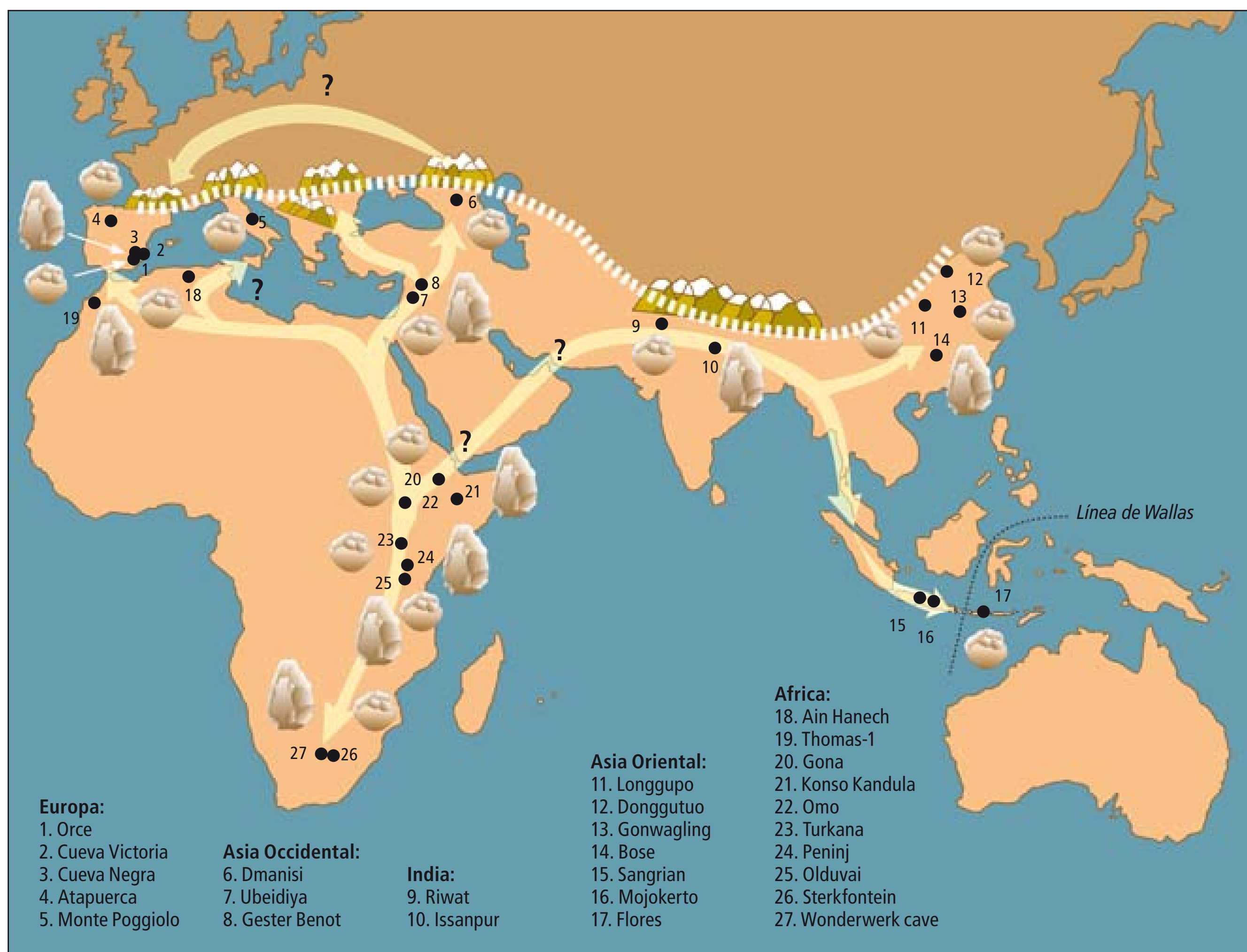
A principios de los años ochenta del siglo pasado, los registros más antiguos de presencia humana en Europa se estimaban en torno a los 0,5 Ma. En 1983, José Gibert, del Instituto de Paleontología Crusafont, y sus colaboradores desafiaron el paradigma establecido: presentaron un fragmento de cráneo humano localizado en Venta Micena (Orce, Gra-





1. GEOGRAFIA DEL ESTRECHO de Gibraltar (*a*) y Flores (*b*). Si el nivel del mar descendiese 120 metros (*gris*), en ambas regiones se formarían islas. En estas condiciones, la barrera marina mínima que *Homo erectus* cruzó para llegar a la isla de Flores fue de 19 kilómetros; en Gibraltar, la barrera sería de 7 kilómetros.

CORTESIA DE PATRICK O'LEARY, *Universidad de Minnesota (arriba)*



2. DISTRIBUCION DE LA INDUSTRIA Olduvayense y Achelense durante el Pleistoceno inferior antiguo junto a rutas migratorias propuestas por varios autores. Se introducen interrogantes en los estrechos y vías en donde no existen datos de presencia humana antigua. La línea discontinua blanca marcaría el límite septentrional de las primeras dispersiones; no está constatada la presencia humana por encima de esa línea antes de un millón de años (Ma). En Africa, el primer conjunto lítico Olduvayense se halla en Gona (Etiopía, 2,6 Ma), en el norte de Africa en Ain Hanech (Argelia, entre 1,5 y 1,6 Ma), en Asia en Dmanisi (Georgia, 1,7 Ma) o Riwat (Pakistán, 1,9 Ma) y en Europa en Orce (1,3 Ma). El primer achelense se encuentra en Konso-Gardula (Etiopía, 1,4 Ma) o Peninj (Tanzania, 1,5 Ma); en el norte de Africa en Thomas Quarry (Marruecos, 1 Ma). En Asia en Bose (China, 0,8 Ma) y en Europa en Cueva Negra (Murcia, 0,9 Ma).

nada) asociado a fauna de hacía 1,5 Ma. Sin duda, en el actual estado del conocimiento, este fósil, el Hombre de Orce, no habría generado la polémica que suscitó.

Más tarde, se identificaron dos fragmentos de húmero que ratificaban la presencia humana en Venta Micena. En 1995, José Gibert excavó en Orce los yacimientos de Barranco León-5 y Fuentenueva-3. Recuperó gran cantidad de restos fósiles y más de 200 útiles de tipo Olduvayense (Modo 1), amén de un fragmento de molar humano. Esos hallazgos, dados a conocer en el Congreso Internacional celebrado en Orce ese mismo año, sirvieron para que la comunidad científica aceptase de forma unánime la presencia humana en la zona.

A partir de ese momento, el debate se centró en la edad de esos fósiles. En 2007, se determinó por métodos paleomagnéticos una cronología mínima de 1,3 Ma. Según la asociación faunística, más antigua, estos yacimientos serían anteriores al de Sima del Elefante en Atapuerca. La primera ocupación humana se hallaría, por tanto, en el sur. En Cueva Victoria (Cartagena) se halló una falange humana asociada a fauna pleistocena con una edad estimada en 1,2 Ma que constata este hecho.

Cabe remarcar que la primera cita europea de dos especies africanas, el primate *Theropithecus oswaldi* y el paquidermo *Hippopotamus amphibius antiquus*, se da en Cueva Victoria y Venta Micena, respectivamente. Es decir, hace entre 1,2 y 1,3 Ma, en la costa y el interior del SE de la península esos homínidos habitaban junto con fauna proveniente de Africa.

La llegada del Achelense a Europa

Hace unos 1,5 Ma, surgió en Africa el Achelense (Modo 2). A diferencia del Modo 1, durante el Achelense se fabricaban útiles con una forma predeterminada y simétrica (bifaces), asociados a un nuevo aprovechamiento de los recursos y a una mayor capacidad cognitiva. La hipótesis establecida hasta ahora situaba la llegada del Modo 2 a Europa

después de los 0,5 Ma. En 2009, un trabajo publicado en *Nature* determinó una edad de 0,9 Ma para Cueva Negra (Murcia), un yacimiento con restos humanos asociados a la industria lítica, donde destaca la presencia de un bifaz. En el mismo estudio, la edad del yacimiento achelense de Solana del Zamborino (Granada) se retrasó hasta 0,76 Ma. Estos datos llenan el vacío que existía en la ocupación humana de esta región y demuestran que en Europa se producían bifaces mucho antes de lo previsto.

Hacia un nuevo paradigma

En el SE de la península Ibérica se documenta la presencia más antigua de dos culturas líticas de origen africano. Ello confiere a la región un papel determinante en el estudio de la transición Olduvayense-Achelense y de la evolución humana en general, pues en Africa se asocia el Modo 1 a restos humanos de tipo *H. habilis*, mientras que el Modo 2 se relaciona con *H. erectus* o *H. ergaster*. ¿Es posible que esos homínidos llegasen a Iberia a través del estrecho de Gibraltar? Hallamos la respuesta en la isla de Flores, Indonesia.

Para llegar a Flores hay que cruzar un mínimo de 19 kilómetros de mar profundo con fuertes corrientes, por donde discurre la línea de Wallace, que separa la fauna asiática de la australiana. Mike Morwood, de la Universidad de Nueva Inglaterra en Australia, publicó en 1998 las dataciones de útiles Modo 1 en la cuenca de Soa: les asignó una edad de 900.000 años. En su estudio, publicado en *Nature*, los autores no dudaban en afirmar que *Homo erectus* fue el primer navegante y que la capacidad cognitiva de esta especie debería ser reevaluada. Estudios recientes retrasan la presencia humana en Flores más allá del millón de años. Por otro lado, la industria lítica descubierta en la isla de Creta sugiere que grupos de pre-sapiens fueron capaces de navegar.

En el caso que nos ocupa, debemos considerar que, en el Pleistoceno Inferior, existían en el noroeste de Africa grupos de homínidos establecidos y que, a diferencia de Flores, los cambios eustáticos cuaternarios redujeron el estrecho de Gibraltar más de un 50 por ciento. Por tanto, sí es razonable considerar migraciones sucesivas desde Africa a través de Gibraltar. Otras rutas suponen cruzar barreras geográficas septentrionales, frías y áridas, lo que probablemente excedería la capacidad adaptativa de unos primeros homínidos de origen tropical.

El registro del Pleistoceno del sur de la península Ibérica sugiere la entrada de los tecnocomplejos Olduvayense y después del Achelense a través de Gibraltar. Los registros de Flores demuestran que, a diferencia de otros mamíferos, *Homo erectus* tenía la capacidad de cruzar barreras marinas. El mismo Mike Morwood demostró esta posibilidad empíricamente: navegó 30 kilómetros hasta Flores en una embarcación prehistórica.

Sin excluir otras vías, los datos expuestos indican que el cruce de Gibraltar fue posible y plausible. No se trataría, por tanto, de una hipótesis *ad hoc*. Es de esperar que, si no se ponen límites al conocimiento, se produzcan nuevos descubrimientos en el norte de Africa y Europa que arrojen luz sobre este debate.

Luis Gibert Beotas
Centro de Geocronología de Berkeley

Impacto ambiental de una red de gas natural

Una baja densidad de habitantes aumenta en gran medida la demanda acumulada de energía asociada a la infraestructura para el suministro de gas natural

Aunque las ciudades sólo representan el 2,7 por ciento de la superficie del planeta, son responsables del 75 por ciento del consumo energético mundial y del 80 por ciento de las emisiones de gases de efecto invernadero. Como respuesta, numerosas políticas nacionales para la reducción de emisiones se centran en acciones a escala urbana. Aunque infravalorada, una oportunidad importante en esta dirección proviene de un mejor diseño de las ciudades. Joshua Engel-Yan y colaboradores, de la Universidad de Toronto, han sugerido que el diseño de barrios sostenibles representa una escala adecuada para afrontar muchos de los problemas ambientales observados en las grandes urbes.

En fecha reciente, junto con Joan Rieradevall y Xavier Gabarrell, de nuestro grupo de investigación, realizamos un estudio acerca del impacto ambiental de una red de distribución de gas natural en función de la densidad de un barrio. Dicho trabajo, publicado en *Applied Energy*, completa y amplía otras investigaciones sobre subsistemas urbanos llevadas a cabo por el grupo SosteniPrA de la Universidad Autónoma de Barcelona, entre ellas estudios sobre el impacto ambiental de los polígonos de servicio y sobre las estrategias de mejora ambiental en el espacio público urbano.

El sistema elegido fue un barrio de 20.000 habitantes caracterizado según tres modelos de densidad de habitantes: densidad baja (casas unifamiliares), densidad media (24 viviendas por edificio) y alta (48 viviendas por edificio). El objetivo consistía en determinar si la forma urbana condicionaba los impactos ambientales globales y, además, si el origen del impacto era el mismo en cada modelo.

Análisis de ciclo de vida

El impacto ambiental ha sido calculado mediante un "análisis de ciclo de vida" (ACV). El ACV constituye una manera objetiva de evaluar las cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad. Para ello, se cuantifican el empleo de materiales y recursos energéticos, así como las emisiones al entorno a lo largo de todas las etapas del proceso objeto de estudio.

Asumimos que la tubería regional de gas natural llegaba hasta los límites del barrio. Para cada área urbana, y durante un período de 50 años, consideramos las etapas de extracción de materias primas, de almacenamiento, los trabajos de instalación (como la energía consumida en abrir las zanjas para la red del barrio), el mantenimiento de componentes y el transporte y la gestión de residuos.

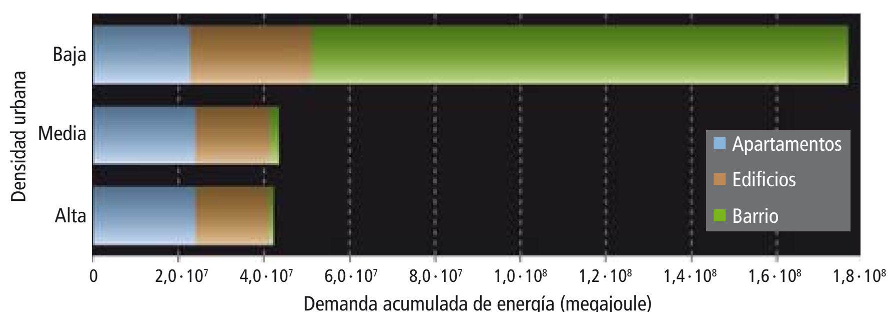
A fin de evaluar con detalle el reparto de la carga ambiental en cada caso, dividimos los componentes de infraestructura en tres subsistemas: red de barrio, edificio y apartamento. La red de barrio incluía la tubería, las arquetas de registro y los trabajos de apertura de la zanja. Al edificio pertenecían la transición PE-Cu (entre la red de la calle, de polietileno, y la red del edificio, de cobre), la acometida, la llave de paso, el armario de contadores y los contadores. El apartamento incluía el bajante, la llave de paso, el manómetro y la caldera. Para todos estos elementos calculamos un tiempo de vida media de 50 años (excepto para la caldera, cuya vida se estima en 15 años).

Densidad del barrio y demanda acumulada de energía

Por simplicidad, aquí presentamos los resultados en función del indicador de "demanda acumulada de energía" (DAE) para cada escenario y subsistema. Un análisis de la DAE consiste en cuantificar el total de la energía consumida, de forma directa o indirecta, a lo largo del ciclo de vida del producto. El recuadro muestra la DAE por vivienda; en cada caso, se indica qué fracción de la demanda energética total se debe a cada uno de los subsistemas de la red de distribución (apartamento, edificio y barrio).

En primer lugar, se observa que la infraestructura para la distribución de gas natural en el barrio de baja densidad requiere cuatro veces más energía que los de densidad media o alta. Además, el grueso del incremento se debe a la red de distribución en el barrio. Si analizamos la demanda por edificio, comprobamos que la DAE es también mayor en el modelo de viviendas unifamiliares que en los otros dos. Ello se debe a que, en dicho modelo, cada casa requiere una conexión individual a la red de distribución de barrio.

En cuanto a las diferencias entre los modelos de densidad media y alta, vemos que el efecto de doblar la densidad acarrea consecuencias irrelevantes para la DAE global. Por su parte, la DAE asociada a la red de barrio resulta el doble en el escenario de densidad media que en el de densidad alta. Ello obedece a que la longitud de la red es dos veces mayor. En cambio, la diferencia por edificio no llega al 1,5 por ciento. A pesar de que el barrio de densidad media requiere el doble de edificios, los componentes relevantes (como los contadores) son proporcionales al número de viviendas. Finalmente, la DAE por apartamento es la misma en ambos modelos.



DEMANDA ACUMULADA DE ENERGIA por vivienda para los modelos de densidad baja, media y alta, en un período de 50 años. Se indica asimismo el consumo asociado a cada subsistema.

Los resultados indican que la distribución de las cargas ambientales entre la red de barrio, edificios y apartamentos cambia radicalmente según la densidad urbana: en el modelo de baja densidad, un 71 por ciento de la DAE se debe a la red de distribución en el barrio; por el contrario, en los escenarios de densidad media y alta, hasta un 95 por ciento de la DAE recae en la red de los edificios y apartamentos.

Nuestro modelo pone de manifiesto que un análisis basado en el ACV puede ayudar en la toma de decisiones que afectan al planeamiento urbanístico. En particular, destaca la función clave que desempeña la red de distribución en los escenarios de baja densidad. Ello nos lleva a concluir que, en estas áreas urbanas, la instalación de una red de distribución de gas natural no parece constituir una buena alternativa desde el punto de vista ambiental. En estos casos, el servicio quizá debería suministrarse mediante sistemas discontinuos, como camiones cisterna.

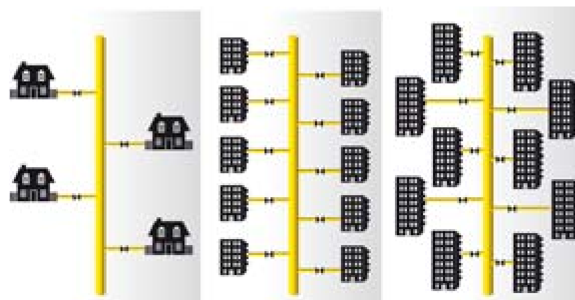
Jordi Oliver Solà
Inèdit Innovació, Parque de Investigación de la UAB y SosteniPrA (UAB-IRTA-Inèdit). Instituto de Ciencia y Tecnología Ambientales (ICTA). Universidad Autónoma de Barcelona.

Ramon Farreny
SosteniPrA (UAB-IRTA-Inèdit). ICTA. Universidad Autónoma de Barcelona.

MODELOS DE DENSIDAD URBANISTICA

El impacto ambiental de un barrio depende en gran medida de su densidad urbanística. Para el estudio que aquí se describe, se consideraron tres modelos de densidad: densidad baja, media y alta.

La tabla muestra las características del barrio entero y de una sección de 100 metros (*ilustraciones*) para cada uno de los tres modelos.



	ESCENARIO	DENSIDAD BAJA	DENSIDAD MEDIA	DENSIDAD ALTA
Barrio	Longitud de red (metros)	166.667	2778	1389
	Edificios (número)	6667	278	139
	Viviendas (número)	6667	6672	6672
Sección calle	Longitud de red (metros)	100	100	100
	Edificios (número)	4	10	10
	Viviendas por edificio (número)	1	24	48

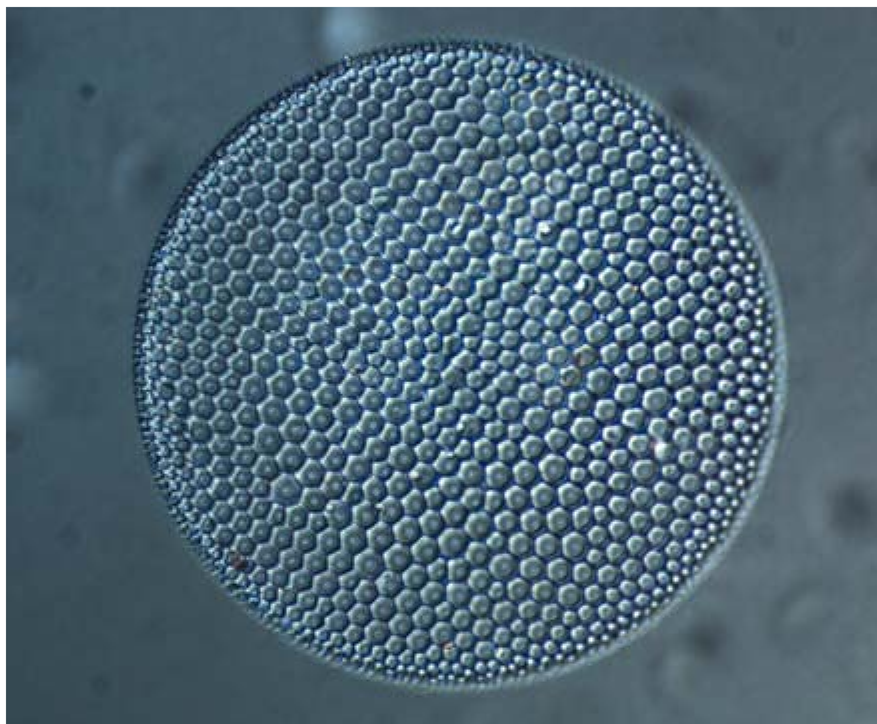
Dispersión sin límites

El carácter cosmopolita de los microorganismos marinos condiciona su biogeografía y los protege del cambio climático

Los océanos albergan una asombrosa diversidad microbiana. Bacterias, algas microscópicas y otros organismos unicelulares tales como foraminíferos o radiolarios desempeñan funciones ecológicas y biogeoquímicas esenciales para el funcionamiento de los ecosistemas marinos, el mantenimiento de los recursos pesqueros y la regulación del clima de la Tierra. Durante décadas, científicos marinos han explorado los mecanismos que controlan la distribución de estos seres microscópicos en el océano. Aunque existen numerosas incógnitas por resolver, estudios recientes han revelado cuestiones clave para entender sus patrones de diversidad y su respuesta a los cambios climáticos.

En 1883, la erupción del volcán Krakatoa, entre las islas de Java y Sumatra (Indonesia), liberó a la atmósfera toneladas de partículas minerales en forma de roca y ceniza. Días más tarde, restos volcánicos se acumulaban a miles de kilómetros de distancia del foco de la erupción. Martinus W. Beijerinck, microbiólogo holandés, quien había observado que sus medios de cultivo eran colonizados de forma recurrente por microorganismos oportunistas, se apoyó en este hecho para proponer la idea de que, como las cenizas del Krakatoa, las especies microbianas, suspendidas en el aire o arrastradas por las corrientes marinas, podrían llegar a colonizar cualquier rincón habitable del planeta.

En 1934, el también microbiólogo y botánico holandés Lourens G. M. Baas Becking formalizó las ideas de Beijerinck en un documento cuya hipótesis central, "todo está en todas partes, pero el medio selecciona", se convertiría en uno de los paradigmas más controvertidos de la microbiología moderna. La teoría tiene hoy en día seguidores y detractores. Sin embargo, en línea con las ideas propuestas por Beijerinck y Baas-Becking, estudios recientes han demostrado que los microorganismos marinos poseen, en efecto, capacidades de dispersión global.



1. CUBIERTA FOSIL de *Coscinodiscus marginatus*, diatomea marina de distribución cosmopolita (el diámetro celular ronda los 60 micrómetros). El estudio de estos microfósiles es fundamental para entender la respuesta de los microorganismos a los cambios climáticos.

CORTESIA DE ISABELLE GIL

Organismos cosmopolitas

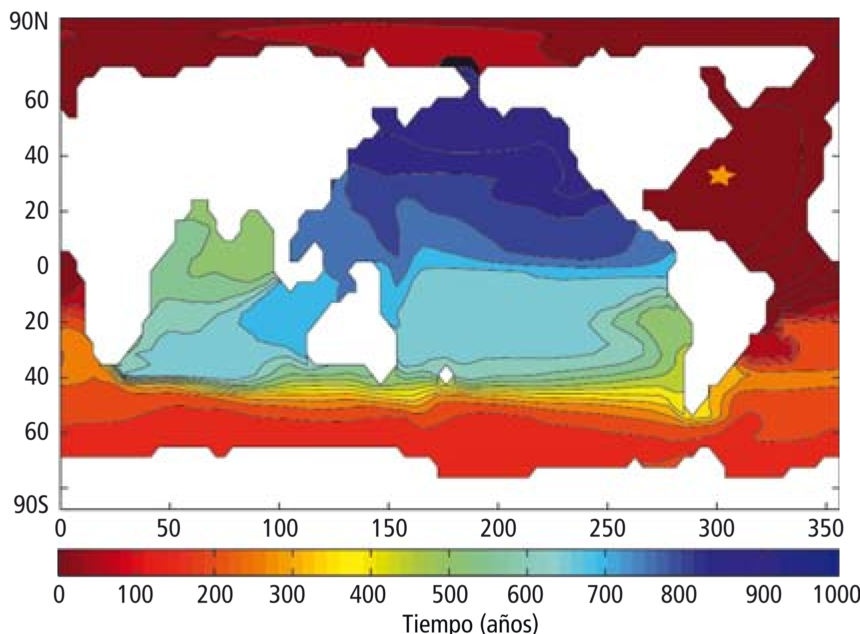
El subsuelo oceánico constituye una fuente incesante de vida microbiana. Cada año millones de bacterias termófilas asociadas a chimeneas hidrotermales del océano profundo [*véase* "Geoquímica de los humeros blancos", por A. S. Bradley; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 2010] son arrastradas por las frías corrientes del océano Artico. En fecha reciente, un grupo de científicos ha logrado reactivar el metabolismo latente de esos microorganismos. Con ello han demostrando que se trata de "semillas" activas, capaces de dispersarse a través de regiones inhóspitas y crecer en sistemas donde las condiciones ambientales son nuevamente favorables.

Las microalgas marinas, responsables de la mitad de la productividad primaria del planeta, tampoco parecen tener límites de dispersión. Varios estudios han mostrado que individuos de una misma especie pueden habitar cualquiera de los cuatro grandes océanos del mundo siempre y cuando encuentren en ellos las condiciones ambientales que exigen sus límites fisiológicos. Los microorganismos marinos son, probablemente, los seres vivos más cosmopolitas del planeta.

En un estudio reciente, hemos demostrado que las diatomeas marinas, un importante grupo de algas microscópicas, poseen capacidades de dispersión global y que su distribución geográfica está controlada por las condiciones ambientales. Estos organismos tienen la capacidad de buscar las condiciones ambientales que se ajustan a sus requerimientos fisiológicos en cualquier parte de los océanos del mundo. Nuestro trabajo, basado en el registro fósil de los últimos 1,5 millones de años, sugiere que este mecanismo podría haber protegido a estos microorganismos de las variaciones climáticas extremas del pasado.

Mecanismos de especiación

La dispersión homogeneiza los ecosistemas ya que, al mantener de forma ininterrumpida el flujo genético entre subpoblaciones de una misma especie, impide la especiación. Sin embargo, las fuerzas



2. TIEMPO QUE TARDA una partícula liberada en el Atlántico (*estrella*) en alcanzar diferentes regiones del océano global.

CORTESIA DE FRANCOIS PRIMEAU

de la naturaleza actúan a menudo de forma contrapuesta. La distribución de especies sobre la Tierra está en buena medida controlada por el balance entre las fuerzas que favorecen la dispersión de especies y las que promueven su aislamiento geográfico. El confinamiento de los canguros en Australia o de los osos polares en el Artico ofrece un claro ejemplo del modo en que la contingencia histórica, al favorecer el aislamiento geográfico, ha generado patrones biogeográficos y endemismos característicos de regiones geográficas concretas.

El aislamiento geográfico restringe el flujo genético entre individuos de una misma especie, promueve la especiación y diversifica los ecosistemas. Se ha estimado que una partícula liberada en el Atlántico Norte tardaría unos mil años en viajar hasta el océano Pacífico, un tiempo insignificante teniendo en cuenta que la formación de especies nuevas puede durar entre decenas de miles y millones de años.

Los microorganismos marinos no pueden quedar aislados geográficamente durante períodos de tiempo largos. Este hecho, sin embargo, contrasta con la asombrosa diversidad de los ecosistemas microbianos en el océano. En general, se ha asumido que la especiación alopátrica, la que ocurre mediada por barreras geográficas que limitan la dispersión, constituye el principal modo de formación de especies nuevas. Los microbiólogos marinos sospechan que, en el océano, la especiación podría seguir reglas ecológicas y evolutivas muy diferentes.

A menudo, individuos de una misma especie adquieren hábitos particulares que les obligan a crecer durante diferentes períodos del ciclo anual (invierno o verano). Al igual que la segregación espacial, la segregación temporal puede aislar subpoblaciones y promover la especiación. Entender los patrones de diversidad y establecer nuevos mecanismos que promuevan la especiación son algunos de los grandes desafíos a los que se enfrenta hoy en día la ecología microbiana.

Los microorganismos no poseen historia. Su alta capacidad de dispersión les ha permitido encontrar el rincón del planeta donde refugiarse y escapar exitosamente de acontecimientos dramáticos que han marcado la historia de la vida sobre la Tierra. Viviendo en un mundo sin barreras, la supervivencia de los microorganismos no parece estar amenazada por el calentamiento climático. Como ha pasado ya multitud de veces a lo largo de la historia, serán nuevamente los macroorganismos los que tengan una mayor probabilidad de sucumbir ante los efectos del cambio climático contemporáneo.

Pedro Cermeño
Departamento de ecología y biología animal
Universidad de Vigo

[INTRODUCCION]

Fascinación por el fin

¿Por qué nos apasionan las historias sobre nuestra propia extinción?

MICHAEL MOYER

76
TIEMPO

FOTOGRAFIAS DE ZACHARY ZAVISLAK



28
MUERTE
71
BIODIVERSIDAD
20
ENVEJECIMIENTO
48
CULTURAS
INDIGENAS
44
MEDICINA FORENSE
AM
7:38
87
PETROLEO
70
AGUA

Una vez más, el fin del mundo se encuentra próximo. Una de las últimas amenazas nos llegaba por cortesía de los antiguos mayas, cuyo calendario, según interpretaba un grupo de escritores oportunistas y directores de cine comercial, presagia el fin de nuestra era para 2012. Algo antes, tres querellas judiciales demandaron al LHC (el Gran Colisionador de Hadrones del CERN, en Ginebra) ante el peligro de que sus colisiones de protones generaran un agujero negro que engulliría el planeta.

Y, hace unos diez años, la industria hubo de invertir miles de millones para amortiguar la catástrofe que sin duda había de provocar el *efecto 2000*.

Cabría pensar que, a estas alturas, el pensamiento científico ya debería habernos inmunizado contra las obsesiones más extravagantes acerca del fin del mundo. Pero no ha sido así, sino más bien al contrario: la ciencia sólo nos ha dado nuevos motivos de preocupación.

De hecho, algunos de los más fervorosos y convincentes catastrofistas son científicos. Bill Joy, cofundador y antiguo director científico de Sun Microsystems, nos ha advertido de que, si escapan a nuestro control, los nanorrobots consumirán todo lo existente sobre la Tierra. Martin Rees, galardonado con la medalla de oro de la Real Sociedad Astronómica británica, ha apostado públicamente por una catástrofe biológica (accidental o intencionada) que habrá de costarle la vida a no menos de un millón de personas antes de 2020. Y hoy son numerosos los climatólogos que advierten contra un calentamiento global fuera de control.

Todos ellos descansan sobre hombros de gigantes: Thomas Malthus, economista británico, pronosticó ya en el siglo XIX que el crecimiento de la población provocaría catástrofes y hambruna mundial. El hecho de que nunca sucediese no fue óbice pare que Paul R. Ehrlich, biólogo de la Universidad Stanford, advirtiese en su obra *La explosión demográfica*, publicada en 1968, que la hambruna planetaria quedaba a veinte años vista. Tampoco entonces llegó el desastre. ¿Significa eso que nunca llegará? No necesariamente. Pero, aun así, a menudo experimentamos un temor desproporcionado ante catástrofes inverosímiles.

Aunque tenga su parte de culpa, la ciencia también nos da pistas sobre el origen de ese temor. Algunos expertos afirman que el pánico al apocalipsis se nutre de nuestra angustia colectiva hacia los acontecimientos que escapan al control individual. El miedo a una guerra nuclear y a la degradación ambiental, que a tantos tuvo en vilo durante la década de 1960, fue clave en el origen de la contracultura, según explica John R. Hall, sociólogo de la Universidad de California en Davis y autor de *Apocalypse: From Antiquity to the Empire of Modernity*. En los últimos años hemos vivido amenazas aún más fundamentales. “Tras los ataques del 11 de septiembre, la crisis económica y desastres como el reciente vertido de la petrolera BP en el golfo de México la gente comienza a preguntarse (y no se reducen a locos o fanáticos) si la sociedad moderna se encuentra capacitada para resolver sus problemas”, opina Hall. Según esta manera de razonar, si el mundo parece estar yéndose al infierno, quizá sea porque es justo eso lo que está ocurriendo.

En parte, semejante impulso procede de nuestra tendencia innata a buscar regularidades: en el fondo, no somos más que animales programados para extraer patrones de comportamiento fijos a partir la amalgama de datos puntuales que nos ofrece la naturaleza. Pero, además, el deseo de ver en sucesos tremebundos los precursores del fin de la civilización también se explica a partir de otro de los rasgos que nos definen como humanos: la vanidad.

Todos creemos vivir en una época extraordinaria, en un momento crítico incluso en lo que respecta a la historia de nuestra especie. La tecnología parece habernos concedido poder sobre el átomo, el genoma y sobre el planeta entero... y quizá con terribles consecuencias. Puede que tal disposición de ánimo se deba a nuestro deseo de ocupar el centro del universo. “La convicción de que *este momento* resulta crítico —en todos los sentidos: para bien, para mal, para el final definitivo de la humanidad— forma parte de la estrechez de miras que caracteriza a nuestra especie”, opina Nicholas Christenfeld, psicólogo en la Universidad de California en San Diego. Al imaginar la proximidad del fin del mundo nos sentimos únicos y especiales.

En el fondo, quizás el temor al apocalipsis constituya un reflejo del más fundamental de todos nuestros miedos: el que nos infunde nuestra propia mortalidad. Todo forma una conjunto: la muerte, la desaparición de nuestra gente y la extinción de nuestra especie. Con independencia de lo que sintamos a modo individual, el mundo es un devenir. Y los finales constituyen una parte ineludible —y a menudo ignorada— de la existencia.

Es por ello por lo que dedicamos nuestro número monográfico de este año a los finales: el final de las culturas indígenas, de los recursos naturales o de la biodiversidad. Algunos resultarán más verosímiles que el resto. Otros, como el final del tiempo, claramente paradójicos. En cualquier caso, comenzaremos hablando del único de ellos que sabemos seguro: el final privado que todos y cada uno de nosotros habremos de afrontar irremediablemente algún día.



En este número especial



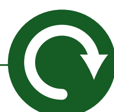
SERES HUMANOS



PLANETA



UNIVERSO



FUTURO



[MEDICINA]

¿Por qué no somos inmortales?

Conforme nos hacemos mayores, nuestras células empiezan a fallar. Desentrañar los misterios del envejecimiento permitiría aumentar la longevidad y mejorar nuestra salud

<< THOMAS KIRKWOOD >>

CONCEPTOS BASICOS

- Nuestra esperanza de vida sigue aumentando. Algunos científicos han comenzado a plantearse si esta tendencia se mantendrá de forma indefinida.
- No todas las especies envejecen. Además, determinados fármacos o cambios en la dieta quizá podrían ralentizar el metabolismo o mitigar algunos procesos básicos del envejecimiento, con lo que se conseguiría alargar la vida. Sin embargo, todavía no se ha demostrado ninguna de las estrategias propuestas para aumentar la longevidad.

Si tuviésemos total libertad para planificar el final de nuestra vida (las últimas semanas, días, horas y minutos), ¿cuál sería nuestra elección? ¿Permanecer en buena forma hasta el último minuto para, a continuación, perecer de forma rápida? Aunque muchos escogerían esta opción, entraña un inconveniente importante: si uno se siente bien en un momento dado, lo último que desearía es fallecer a continuación. Además, la familia y los seres queridos sufrirían un dolor inmediato y nuestra muerte repentina supondría para ellos una pérdida cruel. Sin embargo, las alternativas de padecer una prolongada enfermedad terminal o de perder a alguien querido en la oscura penumbra de la demencia tampoco despiertan interés.

Todos preferimos evitar pensar en nuestro final. Pero a veces conviene hacerlo, no sólo desde un punto de vista personal, sino también con el fin de definir mejor las políticas sanitarias y los estudios científicos. También es importante saber hasta dónde puede ayudar la ciencia en nuestros intentos por burlar la muerte.

VIVIMOS MAS TIEMPO

A menudo se afirma que nuestros antepasados mantenían una relación más natural con la muerte, aunque sólo fuese porque la contemplaban con mayor frecuencia. Hace sólo 100 años, la



JON KRAUSE

esperanza de vida de los países occidentales era unos 25 años inferior a la de hoy. Esa realidad se debía al elevado número de niños y jóvenes que fallecían de forma prematura. La cuarta parte de los niños moría por una infección antes de cumplir los cinco años; las mujeres jóvenes sucumbían con frecuencia a las complicaciones del parto; e incluso un joven jardinero podía perecer a causa de una septicemia fatal tras arañarse la mano con una espina.

A lo largo del pasado siglo, la sanidad y la atención médica lograron reducir de forma espectacular la tasa de mortalidad en los primeros años y la etapa media de la vida. Hoy la mayoría de las personas fallece mucho más tarde y la población es en conjunto más anciana que nunca. La esperanza de vida sigue aumentando en todo el mundo. En los países más ricos lo hace cinco horas o más cada día, y en muchos países en desarrollo que se están acercando a ese nivel, la tasa crece aún más deprisa. En la actualidad, la causa predominante de muerte es el propio envejecimiento y las enfermedades que éste origina, ya sea el cáncer, por la proliferación incontrolada de células o, en el polo opuesto, la enfermedad de Alzheimer, por la destrucción prematura de neuronas.

Hasta tan sólo 1990, los demógrafos sostenían que la tendencia histórica del aumento de la esperanza de vida no tardaría en detenerse. Muchos creían que el envejecimiento estaba fijado, un proceso programado en nuestro organismo que marcaba de forma intrínseca el momento de la muerte.

Nadie previó el ascenso continuado de la esperanza de vida. Ha cogido por sorpresa a nuestros políticos y gestores. Los científicos aún están tratando de aceptar la idea de que el envejecimiento no está predeterminado y de que la esperanza media de vida aún no ha alcanzado un límite, sino que se va ampliando más y más. Si las certezas que imperaban acerca del envejecimiento humano se han desmoronado, ¿qué nos queda entonces? ¿Qué sabe la ciencia sobre el envejecimiento?

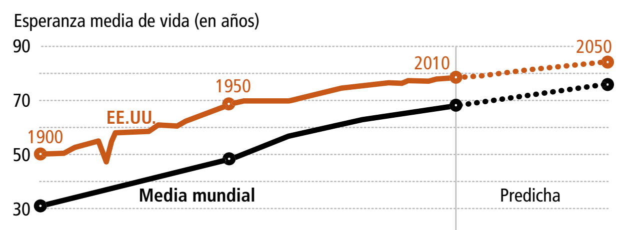
Aceptar nuevas ideas no siempre resulta fácil, porque todos hemos crecido con nociones preconcebidas bastante rígidas sobre la senescencia. Hace algunos años, mientras viajaba con mi familia por Africa, nuestro vehículo atropelló una cabra y ésta murió de forma instantánea. Cuando le explicaba a mi hija de seis años lo sucedido, ella me preguntó: ¿era una cabra joven o una cabra vieja? Sentí curiosidad por el motivo de su interés. "Si era vieja no es tan triste porque, de todos modos, no le quedaría mucho por vivir", me respondió. Me quedé impresionado. Si estas complejas actitudes ante la muerte se forman a una edad tan temprana, no debe sorprendernos que la ciencia moderna no haya descartado las falsas creencias acerca de la senescencia.

Examinemos el conocimiento actual sobre el proceso de envejecimiento. Imaginemos un organismo en los instantes finales de la vida. Cuando le sobreviene la muerte, justo después del último aliento, la mayor parte de sus células siguen vivas. Ignorantes de lo que acaba de suceder, desempeñan, lo

¿CUANTO MAS PUEDE AUMENTAR LA ESPERANZA DE VIDA?

La duración de la vida humana, o esperanza media de vida, viene aumentando desde hace más de 100 años (*gráfico*). Sin embargo, los datos indican que los condicionantes biológicos evitan que la mayoría de los organismos sobrepase una cierta edad, un límite específico para cada especie (*abajo*). Se espera que las actuaciones encaminadas a mitigar esas restricciones permitan prolongar la vida o que, por lo menos, contribuyan a mantener la salud durante más tiempo.

LA VIDA SE ALARGA: Los avances en medicina y sanidad han aumentado la esperanza de vida.



TIEMPO LIMITE: La edad máxima que alcanza una especie, incluidos los humanos, depende de las características biológicas (los organismos más sencillos pueden llegar a edades muy avanzadas) así como del ambiente (un entorno peligroso favorece una reproducción rápida, un envejecimiento acelerado y una muerte temprana).

▼ **MAXIMA ESPERANZA DE VIDA REGISTRADA EN SERES VIVOS SILVESTRES (AÑOS)**



mejor que pueden, las funciones metabólicas que sustentan la vida. Obtienen así oxígeno y nutrientes del medio y los utilizan para generar la energía necesaria para fabricar e impulsar la actividad de las proteínas (principales responsables de las funciones celulares) y otros componentes.

En poco tiempo, privadas de oxígeno, las células perecerán. Con ese acontecimiento se habrá llegado al discreto final de algo inmensamente antiguo. Para todas y cada una de las células del organismo que acaba de sucumbir se podría, si se dispusiera de los registros adecuados, trazar la genealogía a lo largo de una cadena continua de divisiones celulares. Nos remontaríamos así hasta hace unos cuatro mil millones de años, cuando aparecieron las primeras formas de vida celular en el planeta.

La muerte es inexorable. Pero al menos algunas de nuestras células poseen una asombrosa propiedad: están dotadas de una suerte de inmortalidad sin igual en la Tierra. Cuando fallezcamos, si hemos tenido descendencia, un pequeño número de las células de nuestro cuerpo perpetuarán este linaje inmortal en el futuro. Una única célula de nuestro organismo se librará de la extinción (un óvulo o un espermatozoide) por cada uno de los hijos que nos sobrevivan. Los niños nacen, crecen, maduran y se reproducen, y así sucesivamente.

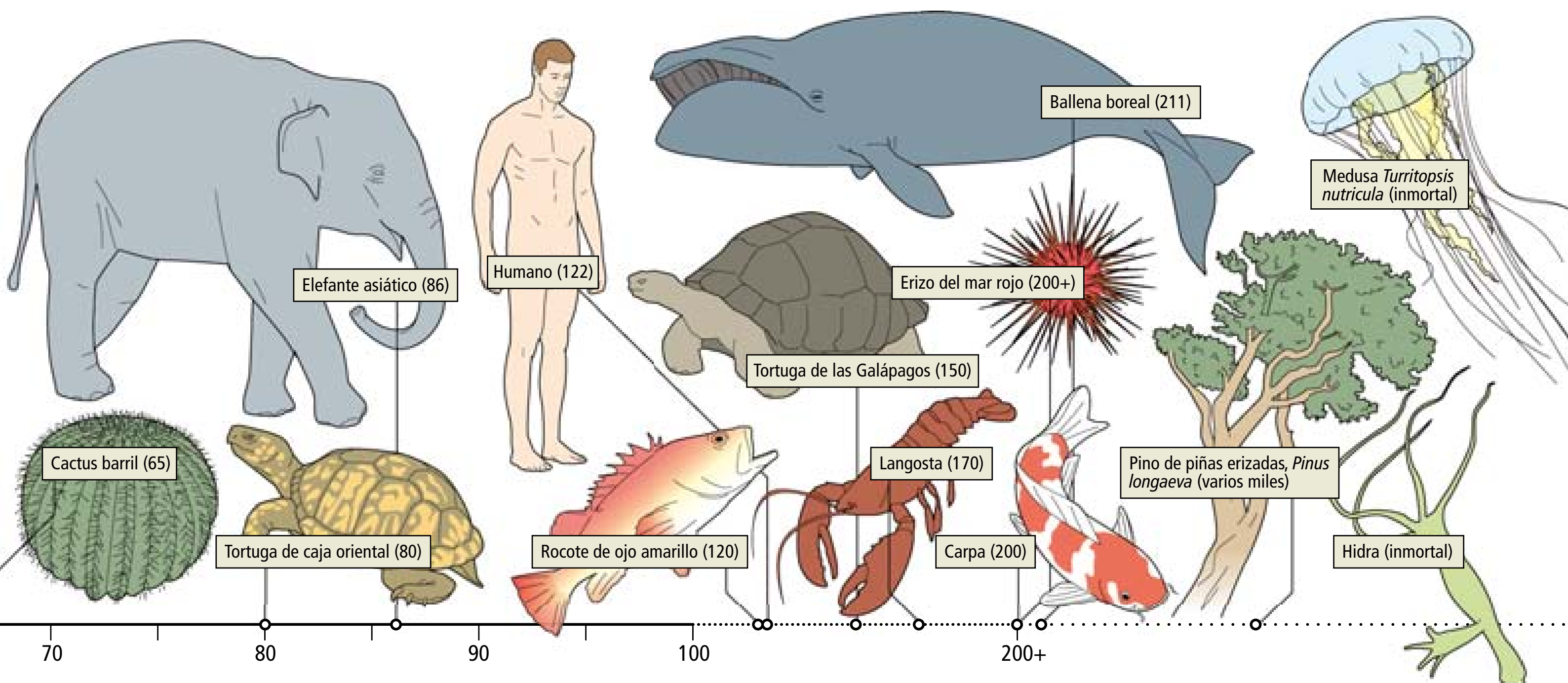
El escenario que acabamos de imaginar pone de relieve no sólo el destino de nuestro cuerpo mortal, o "soma", formado por todas las células no reproductoras, sino también la casi milagrosa inmortalidad del linaje celular al que pertenecemos. He ahí la cuestión central de la ciencia del envejecimiento, de la que se desprenden otras: ¿por qué la mayor parte de las criaturas posee un soma mortal? ¿Por qué la evolución no ha hecho que todas nuestras células disfruten de la aparente inmortalidad del linaje reproductor, o línea germinal, representado por óvulos y espermatozoides? Esta cuestión fue planteada por el naturalista alemán del siglo XIX August Weismann. A principios de 1977 propuse una solución que ha arrojado luz sobre el proceso de envejecimiento de las especies: la teoría del soma perecedero.

¿DE QUE MODO ENVEJECEMOS?

La teoría se entiende mejor si consideramos los obstáculos que deben superar las células y los organismos complejos en su lucha por la supervivencia. Las células sufren daños todo el tiempo; el ADN muta, las proteínas se deterioran, los radicales libres (moléculas altamente reactivas) alteran las membranas y así sucesivamente. La vida depende del copiado y traducción continuos de los datos genéticos. Pero sabemos que la maquinaria molecular que se ocupa de tales funciones, a pesar de su excelencia, no es perfecta. Si se tienen en cuenta esas dificultades, la inmortalidad de la línea germinal resulta, de hecho, extraordinaria.

Las células operan bajo la amenaza constante de la destrucción, y la línea germinal no se ve libre de ella. La razón por la que ese grupo de células no desaparece tras una serie de errores fatales se debe, por un lado, a sus refinados mecanismos de mantenimiento y reparación celular y, por otro, a la neutralización de sus errores más graves tras sucesivas selecciones. Sólo uno de los mejores espermatozoides, producidos en exceso, llegará a fecundar el óvulo. El número de células formadoras de óvulos supera con creces al de células que al final se ovularán; un estricto control de calidad elimina a las que no cumplen con las expectativas. Por último, si los errores logran sortear todos esos controles, la selección natural actúa como árbitro final y decide qué individuos son los mejor dotados para transmitir su línea germinal a las generaciones futuras.

Tras la proeza milagrosa de crear un organismo complejo a partir de una única célula (el óvulo fecundado), debería resultar sencillo hacer que el organismo siguiera funcionando de forma indefinida, tal y como ha señalado el evolucionista George Williams. De hecho, en algunos organismos pluricelulares, la ausencia de envejecimiento parece ser la norma. La hidra de agua dulce muestra un extraordinario poder de supervivencia: no sólo no parece envejecer —no aumenta su mortalidad ni disminuye su fertilidad al avanzar la edad—, sino que además consigue regenerar un organismo nuevo a partir de un diminuto fragmento de su cuerpo. El secreto de la eterna juventud de la

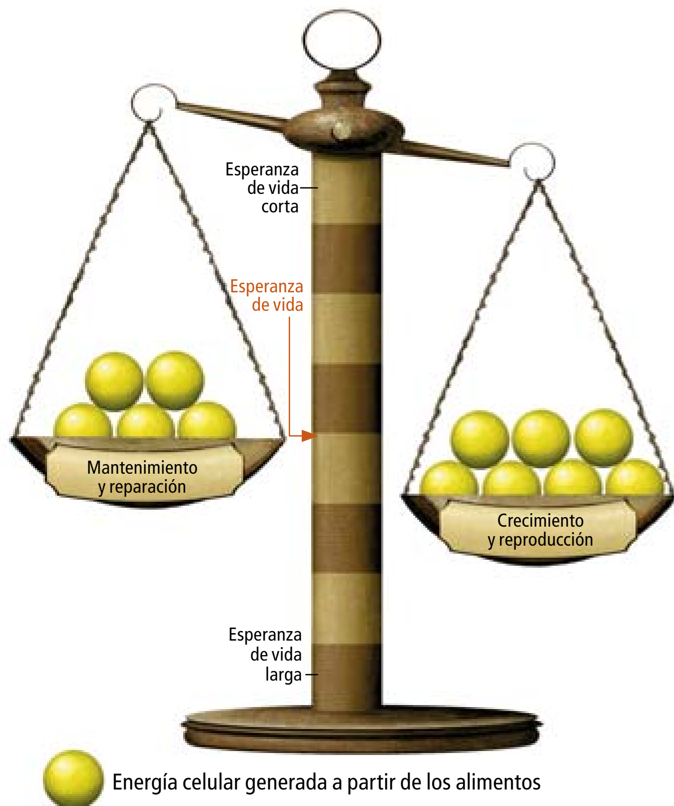


JASON LEE (*animales*); LUCY READING-IKKANDA, FUENTE: "THE WORLD ECONOMY IN MILLENNIAL PERSPECTIVE", DE ANGUS MADDISON, OCDE, 2001 (*mundial, 1900-1950*); "WORLD POPULATION AGEING, 2009", POR NACIONES UNIDAS, DICIEMBRE DE 2009 (*mundial, 1950-2050*); WWW.GAPMINDER.ORG (*EE.UU., 1800-2010*); BASE DE DATOS INTERNACIONAL DE LA OFICINA DEL CENSO DE EE.UU. Y CENTROS PARA EL CONTROL Y LA PREVENCION DE ENFERMEDADES (*EE.UU., 1950-2050*) (*gráfica*)

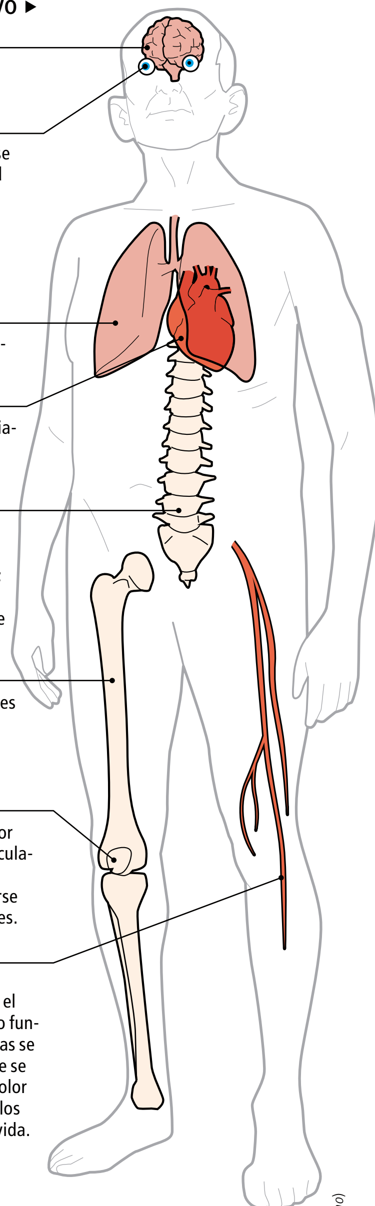
EL ENVEJECIMIENTO, UNA SOLUCION DE COMPROMISO

Según la teoría del soma perecedero, propuesta por el autor, el envejecimiento representa una solución de compromiso al tener que elegir nuestro organismo entre reproducirse o mantenerse en buen estado. Debido a un suministro energético limitado, la balanza se inclina hacia la formación y protección de óvulos y espermatozoides, y se renuncia así a mantener en buen estado las células somáticas (piel, hueso, músculo, etcétera). Como consecuencia, las células van acumulando daños con el tiempo, lo que acaba provocando alteraciones en los órganos. Si las funciones corporales se ven muy afectadas, se produce la muerte.

▼ **DISTRIBUCION DE LA ENERGIA EN EL ORGANISMO**



REDUCIR LA REPARACION CELULAR PROVOCA UN DETERIORO PROGRESIVO ▶



CEREBRO
La memoria y el tiempo de reacción suelen empeorar a partir de los 70 años.

OJOS
La dificultad para enfocar objetos cercanos se produce a partir de los 40 años; la capacidad para ver los detalles finos disminuye a partir de los 70 años; a partir de los 50, aumenta la sensibilidad a la luz deslumbrante y se reduce la capacidad para ver con luz tenue e identificar objetos en movimiento.

PULMONES
Entre los 20 y los 80 años, la capacidad respiratoria máxima disminuye un 40 por ciento.

CORAZON
Entre los 20 y los 75 años, la frecuencia cardiaca durante el ejercicio intenso disminuye un 25 por ciento.

DISCOS INTERVERTEBRALES
La presión que soportan durante años los discos esponjosos que separan las vértebras hace que se deslicen, rompan o sobresalgan; como consecuencia, los discos o las propias vértebras ejercen una dolorosa presión sobre los nervios.

HUESOS
En torno a los 35 años, la pérdida de minerales de los huesos supera a su restitución; la desmineralización se acelera en las mujeres menopáusicas.

ARTICULACIONES
Con los años, el movimiento reduce el espesor de la capa deslizante y protectora de las articulaciones, con lo que los huesos rozan entre sí y se desgastan. El dolor resultante puede verse agravado por la artrosis u otras enfermedades.

VENAS
Cuando las pequeñas válvulas que debieran cerrarse entre latido y latido (para mantener el movimiento de la sangre hacia el corazón) no funcionan correctamente, las venas de las piernas se agrandan y retuercen, de modo que la sangre se estanca. Las varices graves pueden causar dolor e inflamaciones y, en raras ocasiones, coágulos sanguíneos que pueden poner en peligro la vida.

JON KRAUSE (*balanza*); JASON LEE, FUENTE: BALTIMORE LONGITUDINAL STUDY OF AGING (*cuerpo humano*)

hidra es muy sencillo: las células germinales se extienden por todo su organismo. Luego no debe sorprender que una hidra pueda sobrevivir sin un final predecible, suponiendo que no sucumba ante una herida o los depredadores.

Sin embargo, en la mayoría de los animales pluricelulares la línea germinal queda restringida al tejido gonadal, donde se forman los óvulos y los espermatozoides. Esta disposición aporta grandes ventajas. Durante la larga historia de la evolución, permitió que otros tipos de células se especializaran en células nerviosas, musculares o hepáticas, entre otras, necesarias para el desarrollo de cualquier organismo complejo, ya sea un *Triceratops* o un ser humano.

Esa división del trabajo tuvo importantes repercusiones sobre el modo en que los organismos envejecen y la duración de su vida. En cuanto las células especializadas abandonaron la tarea de perpetuar la especie, renunciaron también a la inmortalidad; podían desaparecer después de que el organismo hubiese transferido su legado génico a futuras generaciones a través de la línea germinal.

SOLUCION DE COMPROMISO

Pero, ¿cuánto tiempo pueden sobrevivir esas células especializadas? En definitiva, ¿cuánto tiempo podemos vivir los humanos y otros organismos complejos? En una determinada especie, la longevidad guarda relación con las amenazas ambientales a las que tuvieron que enfrentarse sus antecesores durante su evolución y con el coste energético de mantener al organismo en buenas condiciones de funcionamiento.

La mayoría de los organismos perece a edades tempranas a causa de accidentes, depredadores, infecciones o inanición. Por ejemplo, los ratones salvajes, al medrar en un entorno peligroso, raramente llegan al año de vida. En cambio, los murciélagos sobreviven mejor porque pueden volar.

Por otro lado, el mantenimiento del organismo resulta caro y los recursos suelen ser limitados. Del aporte diario de energía, una parte debe destinarse al crecimiento, otra al trabajo físico y movimiento y otra, a la reproducción. Además, una fracción de la energía debe almacenarse en forma de grasa para hacer frente a las hambrunas, aunque gran parte de ella se consume

al final para reparar los innumerables errores que se producen sin cesar en el organismo. Otra porción de los escasos recursos se emplea en la edición del código genético implicado en la síntesis de nuevas proteínas y de otras moléculas esenciales. Y una última partida se utiliza para impulsar los mecanismos encargados de retirar de la circulación los desechos moleculares, proceso que consume mucha energía.

Cabe introducir en este punto la teoría del soma perecedero. Esta propone que, al igual que un fabricante de productos de consumo diario (como un coche o un abrigo), las especies alcanzan durante su evolución una solución de compromiso. No merece la pena esforzarse en conseguir una supervivencia indefinida si el entorno va a provocar la muerte en un intervalo de tiempo predecible. Para que la especie sobreviva, un genoma necesita, básicamente, mantener al organismo en buena forma y lograr una reproducción eficaz dentro de ese intervalo de tiempo.

En todas las etapas de la vida, incluso al final de la misma, el cuerpo hace todo lo posible por mantenerse vivo; no está programado para el envejecimiento y la muerte, sino para la supervivencia. Pero, bajo la intensa presión de la selección natural, las especies acaban por otorgar mayor prioridad al crecimiento y la reproducción (en la perpetuación de la especie) que a la construcción de un organismo imperecedero. Por tanto, el envejecimiento está provocado por la acumulación gradual, a lo largo de la vida, de lesiones moleculares y celulares no reparadas.

No existen pues en el organismo unas instrucciones que dicten el momento exacto de la muerte. Pero cada vez más pruebas apuntan a la influencia de determinados genes en la duración de nuestra vida. En el decenio de los ochenta, Tom Johnson y Michael Klass descubrieron en nemátodos un gen que influía sobre la longevidad. Observaron que la mutación del gen *age-1* hacía aumentar un 40 por ciento la esperanza media de vida. Desde entonces, investigadores de numerosos laboratorios han descrito en los nemátodos otros genes que alargan la longevidad, así como mutaciones similares en otros animales, desde la mosca de la fruta hasta los ratones.

La mayoría de los genes que aumentan la esperanza de vida modifican el metabolismo del organismo, es decir, la forma en que éste utiliza la energía para desempeñar las funciones corporales. A menudo se observa que esos genes intervienen en la ruta de señalización de la insulina, crucial en la regulación del metabolismo. Las cascadas de interacciones moleculares que constituyen esa ruta provocan cambios en la actividad global de cientos de otros genes responsables de los intrincados procesos de mantenimiento y reparación celular. En efecto, parece que para alargar la esperanza de vida se deben modificar justo aquellos procesos que protegen al organismo de la acumulación de daños.

La cantidad de alimento disponible también hace aumentar o disminuir el metabolismo. Ya en los años treinta se descubrió con cierta sorpresa que los roedores de laboratorio que recibían una dieta pobre prolongaban su vida. De nuevo, la modulación del metabolismo parece afectar a la tasa de acumulación de daños, ya que los ratones con una dieta restringida incrementan la actividad de una serie de sistemas de mantenimiento y reparación. A primera vista, parecería extraño que un animal con una alimentación deficiente invirtiera más energía, y no menos, en el mantenimiento del organismo. Sin embargo, un periodo de hambruna representa una mala época para reproducirse. Algunos datos indican que durante ese tiempo ciertos animales prefieren reducir la fertilidad y derivar así una fracción importante de los recursos energéticos remanentes al mantenimiento celular.

FLEXIBILIDAD METABOLICA

La idea de la restricción calórica —y su aparente capacidad para aumentar la longevidad— ha captado la atención de quienes desean vivir más tiempo. Sin embargo, las personas que pasan hambre con la esperanza de alargar la vida deberían contar con la probable ineficacia de ese método, porque nuestro lento metabolismo difiere en gran medida del de los organismos en que se ha comprobado esa estrategia.

De hecho, el aumento extraordinario de la esperanza de vida se ha verificado en gusanos, moscas y ratones. Esos animales de vida corta y reacciones orgánicas aceleradas necesitan un metabolismo que se adapte con rapidez a las circunstancias cambiantes. En los nemátodos, los efectos más espectaculares sobre la esperanza de vida se deben sobre todo a las mutaciones que les han permitido adoptar una forma de vida resistente cuando se hallan en un ambiente adverso y se ven en la necesidad de esperar unas mejores condiciones. De todas formas, puede que los humanos carezcamos de esa flexibilidad metabólica. Por supuesto, aquellos que se someten a una restricción dietética experimentan efectos metabólicos inmediatos, pero sólo el tiempo dirá si la estrategia ha ejercido algún beneficio sobre el proceso de envejecimiento y, concretamente, sobre la longevidad. Sin embargo, el objetivo de la investigación gerontológica en los humanos consiste en mejorar la salud durante la etapa final de la vida, no en conseguir la edad de Matusalén.

Otro aspecto resulta también evidente: los gusanos, moscas y ratones que viven más tiempo no dejan por ello de envejecer. Ello se debe a que los daños se siguen acumulando y, con el tiempo, provocan la interrupción de las funciones saludables para el organismo. Por tanto, si deseamos un final de vida realmente mejor, debemos centrarnos en otras cuestiones. Debemos pensar, en particular, cómo limitar o anular de forma segura la acumulación de daños que, en última instancia, originará la debilidad, discapacidad y enfermedad asociadas a la edad. Este objetivo representa un tremendo desafío y exige algunas de las investigaciones interdisciplinares más complejas de la actualidad.

NO HAY RESPUESTAS SENCILLAS

El envejecimiento es complicado. Afecta al organismo en todos los niveles, desde las moléculas hasta las células y órganos. También conlleva múltiples daños celulares y moleculares. Y aunque, en general, las lesiones se acumulan con la edad y se producen más despacio en algunos tipos de célula que en otros (dependiendo de la eficacia de los sistemas de reparación), el

EL AUTOR



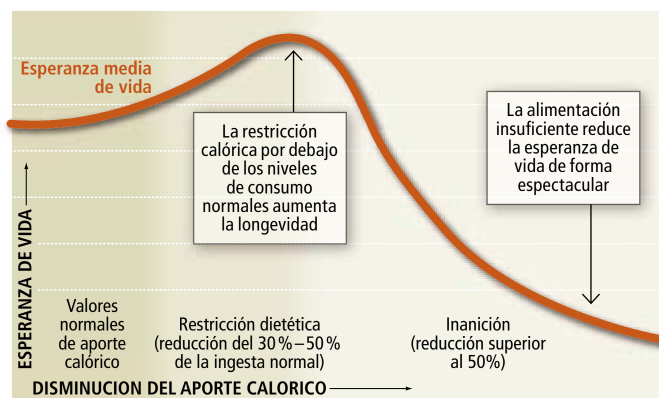
Thomas Kirkwood es catedrático de medicina y director del Instituto para el Envejecimiento y la Salud de la Universidad de Newcastle, en el Reino Unido. Ha estudiado los efectos del azar, los genes y el medio en el crecimiento, el desarrollo y el envejecimiento del organismo.

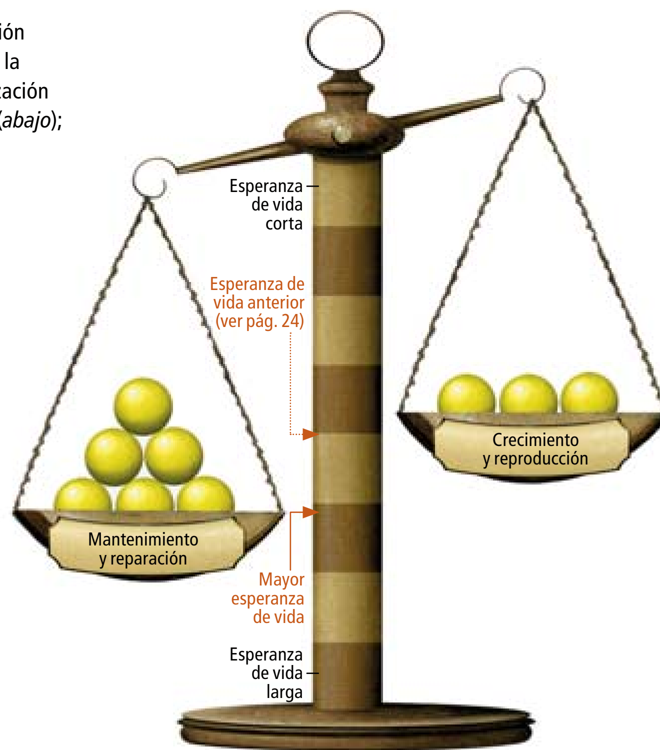
¿PODEMOS RETRASAR EL ENVEJECIMIENTO?

Nadie sabe todavía cómo retrasar el envejecimiento humano. Pero la investigación básica sobre este proceso podría dar lugar, en última instancia, a fármacos para la longevidad. Algunos compuestos lograrían ajustar el metabolismo celular (utilización de la energía) para reproducir los efectos beneficiosos observados en animales (*abajo*); otros modificarían el comportamiento de las células dañadas (*página opuesta*).

DELGADEZ Y LONGEVIDAD: Determinadas terapias podrían reconducir el metabolismo celular. Estas favorecerían las funciones de mantenimiento y reparación, y disminuirían la fertilidad, con lo que los órganos se mantendrían sanos durante más tiempo. La restricción calórica alarga la esperanza de vida de las moscas, gusanos y ratones en comparación con los animales con una alimentación normal (*gráfico*). Aún no está claro si esta estrategia resulta eficaz en los humanos.

▼ **LA RESTRICCION CALORICA ALARGA LA ESPERANZA DE VIDA EN ANIMALES**





▲ **LA RESTRICCION CALORICA MODIFICA LA DISTRIBUCION DE LA ENERGIA**

deterioro de una célula concreta tiene lugar de manera aleatoria, y el alcance de los daños puede variar incluso en dos células del mismo tipo en un individuo. Por tanto, aunque todos los organismos envejecen y mueren, lo hacen de forma muy diversa, otra confirmación de que la senescencia no responde a un programa genético que determina cuándo nos debilitamos y fallecemos. Para comprender el envejecimiento con suficiente detalle para dirigir nuestras intervenciones a fin de detener o retrasar la muerte de determinados tipos de célula, necesitamos conocer la naturaleza de los defectos moleculares que provocan el envejecimiento a nivel celular. ¿Cuántos de esos defectos deben acumularse para que la célula deje de funcionar? ¿Cuántas células defectuosas deben reunirse en un determinado órgano para que éste empiece a mostrar síntomas de enfermedad? Y si priorizamos la actuación en algunos órganos en lugar de otros, ¿cómo conseguiremos nuestro objetivo?

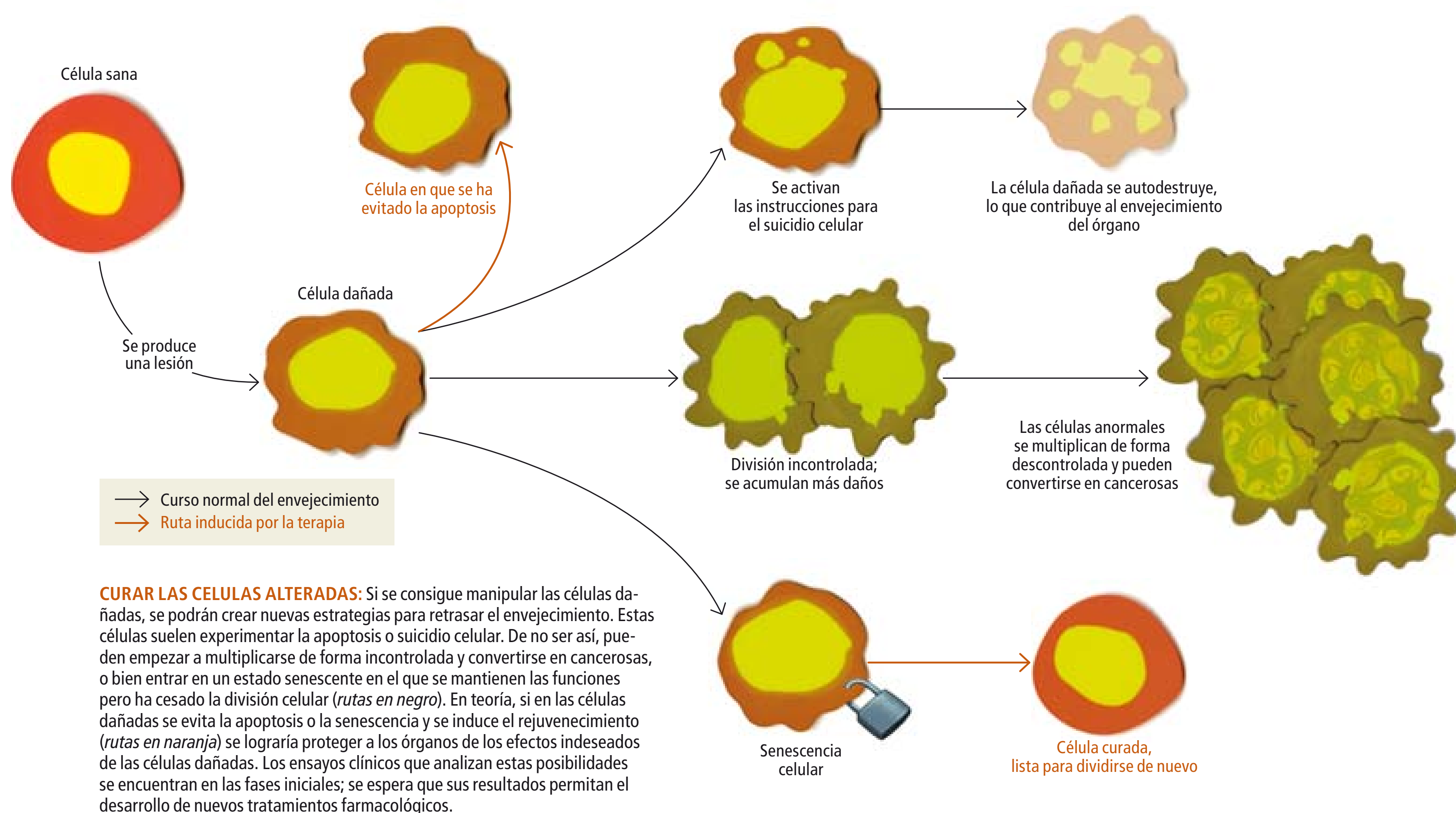
Una posibilidad de combatir el envejecimiento consistiría en modificar los importantes mecanismos que utilizan las células para contrarrestar la acumulación de daños. La apoptosis, o suicidio celular, representa una de las reacciones frente al desgaste celular. Al principio, se consideró ese mecanismo como una prueba de que el envejecimiento respondía a un programa genético. En tejidos envejecidos aumenta la frecuencia de la apoptosis y, de hecho, este proceso contribuye al propio envejecimiento. Pero hoy en día sabemos que la apoptosis constituye una estrategia de supervivencia en el organismo de mayor tamaño, ya que elimina las células dañadas que podrían causar problemas en particular las que se han vuelto malignas.

El suicidio celular se da con mayor frecuencia en órganos viejos porque sus células han sufrido un mayor deterioro. Pero en la naturaleza apenas existen animales que vivan lo suficiente para llegar a envejecer. La apoptosis surgió en la evolución para suprimir las células dañadas de órganos jóvenes, donde se acumulan en menor número que en órganos senescentes. Si se destruyen demasiadas células, el órgano termina por fallar o debilitarse. Por tanto, la apoptosis presenta un doble aspecto: ejerce un efecto positivo cuando elimina células potencialmente peligrosas, pero resulta perjudicial cuando suprime demasiadas células. La naturaleza se preocupa más de la supervivencia de los jóvenes que de neutralizar el declive asociado a la vejez, de modo que en nuestros últimos años podrían producirse apoptosis innecesarias. En algunas enfermedades, como la apoplejía, los investigadores esperan que, al detener la apoptosis en los tejidos menos dañados, se atenuará la pérdida de células y se favorecerá la recuperación.

En vez de suicidarse, las células dañadas que conservan la capacidad de reproducirse pueden optar por una solución menos drástica, la senescencia replicativa, en la que sencillamente dejan de multiplicarse. Hace cincuenta años, Leonard Hayflick, actualmente en la Universidad de California en San Francisco, descubrió que las células suelen experimentar un número fijo de divisiones —lo que hoy en día se conoce como el límite de Hayflick—, superado el cual las divisiones se detienen. Trabajos posteriores demostraron que, a menudo, esa interrupción se producía cuando los telómeros que protegen los extremos de los cromosomas se desgastan demasiado. Pero otros aspectos sobre la aparición de la senescencia celular quedaron sin esclarecerse.

Sin embargo, hace poco mi equipo ha realizado un descubrimiento apasionante. Se ha observado que cada célula posee un circuito molecular muy sofisticado que comprueba

JON KRAUSE (*balanza y células*); LUCY READING-IKKANDA; FUENTE: "EXTENDING HEALTHY LIFE SPAN—FROM YEAST TO HUMANS", DE LUIGI FONTANA ET AL. EN *SCIENCE*, VOL. 328; 16 DE ABRIL DE 2010 (*gráfico*)



CURAR LAS CELULAS ALTERADAS: Si se consigue manipular las células dañadas, se podrán crear nuevas estrategias para retrasar el envejecimiento. Estas células suelen experimentar la apoptosis o suicidio celular. De no ser así, pueden empezar a multiplicarse de forma incontrolada y convertirse en cancerosas, o bien entrar en un estado senescente en el que se mantienen las funciones pero ha cesado la división celular (*rutas en negro*). En teoría, si en las células dañadas se evita la apoptosis o la senescencia y se induce el rejuvenecimiento (*rutas en naranja*) se lograría proteger a los órganos de los efectos indeseados de las células dañadas. Los ensayos clínicos que analizan estas posibilidades se encuentran en las fases iniciales; se espera que sus resultados permitan el desarrollo de nuevos tratamientos farmacológicos.

el deterioro del ADN y de las mitocondrias, las unidades encargadas de producir energía. Cuando la cantidad de daños supera cierto umbral, la célula se sume en un estado en el que sigue desempeñando funciones útiles para el organismo pero ha perdido la capacidad de dividirse. Como en la apoptosis, la preferencia de la naturaleza por la supervivencia de los más jóvenes significa, probablemente, que no todos estos niveles de contención son estrictamente necesarios. Igual que en la apoptosis, si quisiéramos suprimir esas restricciones con el fin de restablecer la división de las células envejecidas sin desencadenar la amenaza del cáncer, antes deberíamos comprender el funcionamiento exacto de la senescencia celular.

Los estudios complejos que posibilitaron este descubrimiento precisaron la participación de un equipo multidisciplinar de biólogos moleculares, bioquímicos, matemáticos e informáticos, así como el uso de instrumentos de última generación para obtener imágenes de los daños en células vivas. Desconocemos aún las repercusiones de esos descubrimientos, pero sólo mediante este tipo de estudios podremos identificar nuevos medicamentos que traten de una forma nueva las enfermedades asociadas a la edad y, de este modo, acortar el período de enfermedades crónicas al final de la vida. La dificultad de esta investigación básica hace suponer que esos medicamentos todavía tardarán algunos años, tal vez decenios, en llegar al mercado.

Utilizar la ciencia del envejecimiento para mejorar la recta final de la vida representa un desafío, quizás el mayor al que deberá enfrentarse la medicina. Las soluciones no resultarán sencillas, a pesar de las pretensiones de los mercaderes de la inmortalidad cuando afirman que la restricción calórica o los suplementos dietéticos como el resveratrol nos ayudan a vivir más tiempo. Se necesitarán las más altas dosis de ingenio para afrentar este desafío. Creo que lo resolveremos: desarrollaremos tratamientos que harán más llevaderos nuestros últimos años. Pero cuando llegue el final, cada uno de nosotros deberemos aceptar la idea de nuestra cualidad de mortales. Razón de más para que nos centremos en vivir, en sacar el máximo partido de nuestras vidas, porque ningún elixir mágico nos salvará.

PARA SABER MAS

UNDERSTANDING AGEING. Robin Holliday. Cambridge University Press, 1995.

POR QUE ENVEJECEMOS: QUE ESTA DESCUBRIENDO LA CIENCIA SOBRE LA TRANSFORMACION DEL CUERPO A TRAVES DE LA VIDA. Steven N. Austad. Ediciones Paidós Ibérica, 1998.

COMO Y POR QUE ENVEJECEMOS. Leonard Hayflick. Herder Editorial, 1999.

EL FIN DEL ENVEJECIMIENTO. CIENCIA Y LONGEVIDAD. T. Kirkwood. Tusquets editores, 2000.

CHANCE, DEVELOPMENT, AND AGING. Caleb E. Finch y T. Kirkwood, Oxford University Press, 2000.

UNDERSTANDING AGEING FROM AN EVOLUTIONARY PERSPECTIVE. T. B. Kirkwood en *Journal of Internal Medicine*, vol. 263, n.º 2, págs. 117-127; febrero, 2008.

THE END OF AGE. Thomas Kirkwood. BBC Reith Lectures. www.bbc.co.uk/radio4/reith2001



[BIOETICA]

Trasplantes: entre la vida y la muerte

Al contarse por millares las personas en espera de un trasplante, los médicos están reconsiderando la norma para declarar fallecido al donante. ¿Resulta ético tomar una vida y dársela a otro?

<< ROBIN MARANTZ HENIG >>

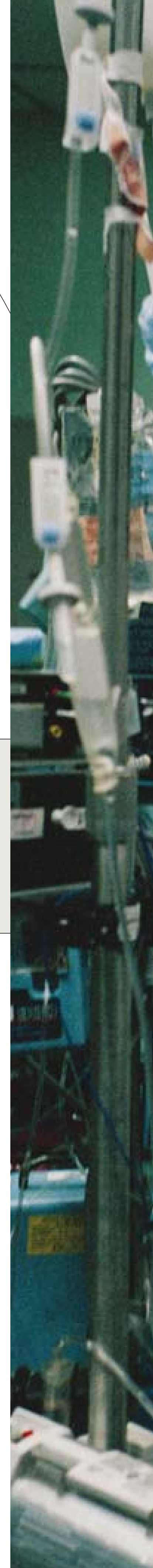
CONCEPTOS BASICOS

- Antes de extraer los órganos de un donante, los cirujanos han de esperar tras el óbito un tiempo especificado.
- En ese intervalo, los órganos, faltos de oxígeno, se degradan; de ahí la enorme importancia de determinar el momento preciso del fallecimiento. Aun así, el proceso de la muerte puede hacer inutilizables los órganos.
- Se ha empezado a cuestionar la necesidad de que el paciente esté totalmente muerto antes de iniciar la cirugía de trasplantes.

Antaño la muerte se reconocía con facilidad, según si latía o no el corazón de una persona. Esta nítida definición quedó empañada hace ya bastantes años, al lograr las técnicas médicas mantener el latido del corazón casi de modo indefinido. A pesar de haberse reflexionado durante decenios sobre las diversas situaciones de insuficiencia fisiológica grave, tan sólo se ha conseguido acrecentar la confusión. ¿En qué momento resulta ético desconectar un respirador o suprimir la alimentación nasogástrica o intravenosa? ¿En qué instante carece de objeto mantener el "soporte vital"? Y la cuestión de máxima y decisiva importancia: ¿en qué punto es lícito abrir un cuerpo humano para extraer, sea por caso, un corazón que daría nuevos alientos a otra vida?

No se trata de academicismos. Son cuestiones urgentes, que conciernen tanto a los costes del sistema sanitario —¿se han de utilizar costosos equipos en un cuerpo que, a todos los efectos, carece de vida?— como a la dignidad de la persona próxima a fallecer. En el marco del debate sobre el sistema sanitario estadounidense, la controversia generada alrededor de las "comisiones de muerte" (que supuestamente decidirían a qué parientes se deja morir) ha dado pábulo al temor, tal vez no infundado, de que se abuse de los individuos cuando más débiles se encuentren.

Pero, sobre todo, lo que mueve a los expertos en bioética para acertar con una definición rigurosa de la muerte es la donación de órganos. Sólo en EE.UU., más de 100.000 personas están esperando ese órgano que les salvaría la vida. Cada



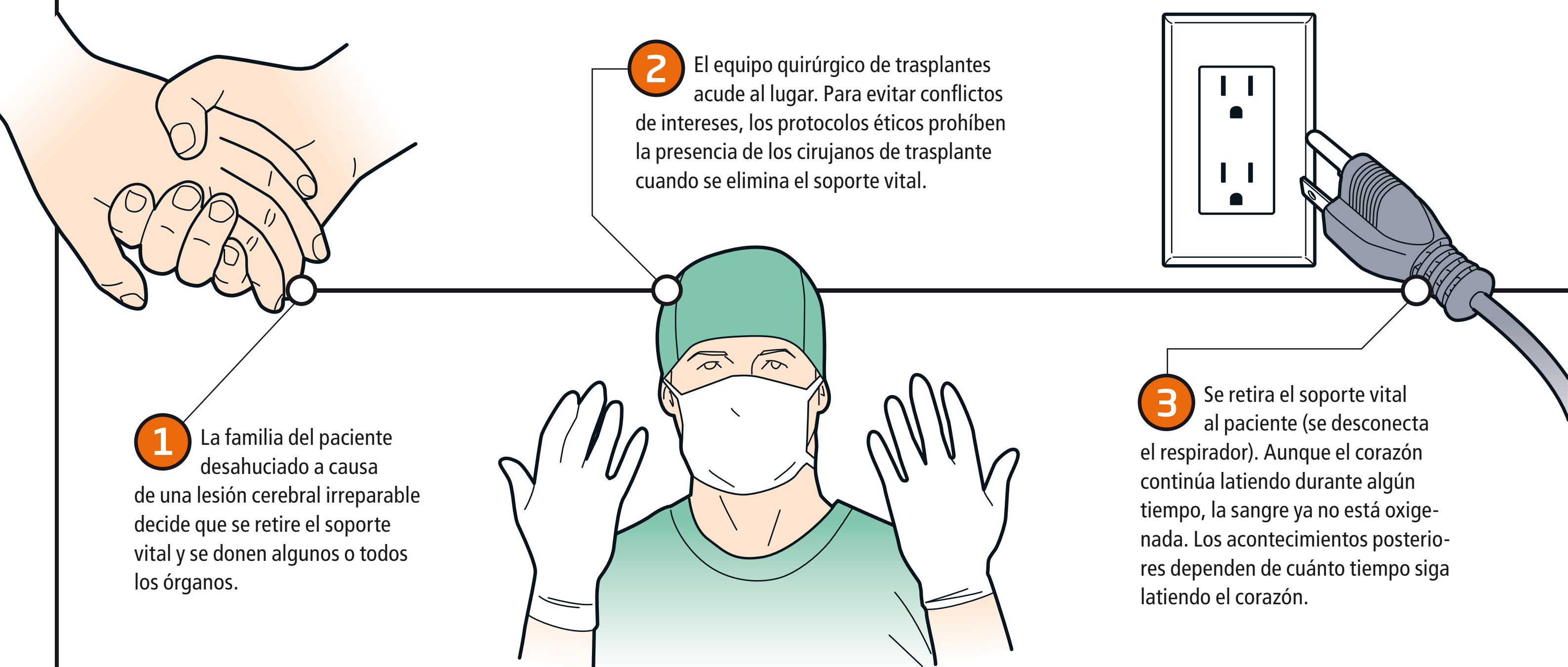
MAX AGUILERA-HELLWEG



1. EL ULTIMO REGALO. Más de 8000 individuos donaron sus órganos el año pasado en EE.UU. En la foto, los cirujanos están extrayendo el corazón, los riñones, el páncreas, el hígado, los pulmones, los ojos y algunos huesos de una mujer que ha sufrido muerte cerebral.

UN CRONOMETRO EN EL QUIROFANO

La mayoría de las extracciones se efectúan cuando se confirma la muerte cerebral del donante: la corteza y el tronco encefálico sufren una lesión irreparable. Si la lesión afecta sólo al cerebro superior, antes de comenzar la extracción de órganos deben retirarse los equipos de soporte vital y se ha de aguardar hasta el último latido del corazón. El tiempo de espera es fundamental: debe ser suficiente para permitir la recuperación espontánea del corazón, pero no tan largo que los órganos, faltos de oxígeno, se degraden y resulten inutilizables.



JASON LEE

año fallecerán unas 7000 durante la espera. Urge identificar el momento exacto de la muerte. Cuanto antes se pueda extraer un órgano, menos tiempo sufrirá éste la carencia de oxígeno y mayor será la probabilidad de éxito del trasplante. De ahí la presión para extraer órganos tan pronto como resulte éticamente admisible, lo que ha llevado a algunos cirujanos a adentrarse en aguas procelosas.

En 2008, Hootan Roozrokh, un cirujano de trasplantes de San Francisco, hubo de afrontar cargos penales por acelerar la muerte (aunque no por provocarla) de un posible donante de hígado. (Fue absuelto.) Apenas unos meses después, un equipo de cirujanos pediátricos de Denver estuvo en el punto de mira por haber trasplantado los corazones de tres recién nacidos con lesiones cerebrales letales menos de dos minutos después del último latido cardíaco. Los críticos juzgaron demasiado breve el tiempo de espera para tener la certeza de que los órganos no volverían a latir espontáneamente. El proceder de los cirujanos vulneraba protocolos médicos respetados durante decenios, concebidos con el propósito firme de evitar la obtención de órganos de personas vivas. En su defensa, los cirujanos atacaron el nudo gordiano del debate sobre la muerte y los trasplantes: ¿en qué punto es aceptable declarar extinta una vida con el propósito de salvar otra?

Médicos y expertos en ética han dado vueltas a ese dilema durante los últimos cuarenta años, esforzándose en definir la muerte a fin de conjugar la donación de órganos y los principios morales. En el proceso se han creado términos desconcertantes y un tanto fantasmagóricos, como "muerte cerebral" o "cadáver con latido". Se ha ideado también un sistema que podría dar lugar a una nueva causa de muerte socialmente aceptable, en el que los médicos extraerían órganos a pacientes con lesiones irreversibles pero aún vivos. Habrá quien lo llame "muerte por donación de órganos".

LA NORMA

En los años sesenta, cuando se demostró factible el trasplante de órganos, se quiso garantizar desde la bioética que los cirujanos de trasplantes no se excedieran en su celo salvador. Impusieron el imperativo ético de que el donante hubiera fallecido: sólo podrían tomarse órganos de donantes legalmente difuntos. Pero en un hospital moderno y bien equipado, ¿en qué momento exacto fallece el donante? Conservar el aliento y el pulso no significa exactamente estar "vivo"; las técnicas médicas avanzadas pueden lograr que casi cualquiera respire y mantenga el latido del corazón. Si la muerte se define como se venía haciendo desde hace milenios —el cese de las funciones respiratoria y circulatoria— ¿qué calificación daremos a un paciente cuya vida depende de un respirador?

Para abordar la cuestión, en 1968 se reunió una comisión de expertos de la facultad de medicina de Harvard que estableció el concepto de "coma irreversible", también conocido como "muerte cerebral". Se entendía como tal la destrucción irreparable de la corteza encefálica, sede de la consciencia, el habla, la empatía, el miedo y de cuanto caracteriza a los humanos; pero también se incluía la destrucción del tronco encefálico, que orquesta funciones fisiológicas tan fundamentales como la



respiración, el latido cardíaco o la homeostasis. La maquinaria médica moderna podría mantener oxigenado al organismo, pero la persona que ese cuerpo albergara habría muerto.

Desde entonces, la definición de muerte ha sido revisada periódicamente por grupos de bioéticos y, aunque la terminología varíe en ocasiones, en esencia sigue siendo la misma. La noción de muerte cerebral se ha incorporado al cuerpo legal de casi todos los estados de EE.UU. Los expertos y la ley están de acuerdo: una persona que haya sufrido la destrucción de la corteza y del tronco encefálico está muerta, incluso aunque su cuerpo esté caliente y sonrosado. Ese cuerpo ya no se considera una persona, sino un cadáver cuyo corazón sigue latiendo.

Esa definición ofrece enormes ventajas al cirujano de trasplantes. El deterioro de los órganos por carencia de oxígeno comienza a los pocos minutos de cesar el latido cardíaco y la respiración, lo que hace muy deseable una pronta extracción de los órganos que se van a trasplantar. A partir del criterio neurológico, puede planificarse tal momento. Basta con sincronizar la desconexión del respirador con la llegada del equipo quirúrgico que va a retirar los órganos. De hecho, al menos el 85 por ciento de los donantes de órganos vitales para trasplantes cumplen los criterios de muerte neurológica.

¿Y el 15 por ciento restante? Ahí se halla la zona de penumbra. El cerebro de esas personas sufre una lesión permanente, pero su tronco encefálico se mantiene activo, es decir, no se ha producido la muerte cerebral. Para declararlas difuntas es necesario recurrir a la antigua usanza: han de dejar de respirar y su corazón ha de cesar de latir. Con el advenimiento de las técnicas médicas modernas, la determinación precisa de ese momento suele ser más compleja de lo que parece.

UNA MUERTE CIERTA

El sistema de trasplantes empieza a fallar cuando un posible donante de órganos sufre un accidente cerebrovascular masivo que destruye todas las funciones superiores del cerebro, como en el caso en que se vio envuelto Hootan Roozrokh. También cuando nace un niño con lesiones cerebrales profundas por una anencefalia o cuando, como en el hospital de Denver, las complicaciones del parto privan de oxígeno al cerebro durante minutos cruciales. Sin duda, esas personas van a fallecer en cuanto se les retire el soporte vital; pero si perecen de tal modo que pueda conservarse su corazón, pulmones o hígado, se podrán prolongar las vidas de otros seres. He ahí el quid: dichos órganos no pueden ser extraídos hasta que esos pacientes fallezcan por sí solos. Organos que quedarían destruidos si la muerte se produjera con demasiada lentitud.

En la preparación del trasplante, el médico retira el soporte vital al paciente mediante la desconexión de los equipos de circulación sanguínea y de respiración que mantienen oxigenados a los órganos. Con el tiempo, el corazón cesará de latir, pero si tarda más de una hora en detenerse, se abandona el trasplante; en ese intervalo, los órganos, agotado el oxígeno disponible, se han deteriorado demasiado. Si tarda menos de una hora, se acomete la segunda fase: el cirujano espera todavía unos pocos minutos tras el paro cardíaco, los suficientes para concederle



2. UNA NUEVA OPORTUNIDAD. Alrededor del 85 por ciento de los receptores de un trasplante cardíaco estadounidenses todavía viven un año después de la operación, y más del 50 por ciento continuarán haciéndolo más de un decenio. En la imagen, un cirujano extrae el corazón de un receptor de trasplante.

al corazón la oportunidad de volver a latir espontáneamente, antes de proceder a la extracción de órganos. Hasta la fecha, ningún corazón ha vuelto a palpitar por sí solo tras dos minutos de detención, por lo que según el Protocolo de Pittsburgh los médicos, antes de retirar órganos, han de esperar al menos 120 segundos contados desde el último latido.

¿Qué estará pasando por la mente del cirujano durante esos dos minutos? Los órganos van degradándose con cada tictac del reloj. Las posibilidades de éxito del trasplante y de salvar otra vida se reducen por momentos. Y el margen de espera, establecido por una comisión, es un tanto arbitrario.

Dos cirujanos de trasplantes pediátricos, David Campbell y Biagio Pietra, del Hospital Infantil de Denver, se vieron en esa situación en tres ocasiones, entre 2004 y 2007. En cada una de ellas, un neonato del hospital sufría una cardiopatía congénita grave. Los cirujanos habían intentado reparar aquellos diminutos corazones, pero sin éxito. Sin un trasplante, ninguno de esos niños sobreviviría.

Los cirujanos hallaron posibles donantes recién nacidos con lesiones cerebrales graves provocadas por apnea durante el parto, pero con corazones sanos y palpitantes. Esos recién nacidos iban a perecer. La única cuestión era si podrían salvarle la vida a otros niños. Los cirujanos desconectaron los aparatos y esperaron, pero no los 120 segundos completos; en dos casos, actuaron tras sólo 75 segundos del postrer latido cardíaco.

Como posteriormente escribieron los cirujanos en *New England Journal of Medicine* (*NEJM*), actuaron asesorados por la comisión de ética de su hospital, que consideró que los cirujanos se veían éticamente obligados a infringir el Protocolo de Pittsburgh en favor de los tres niños necesitados de corazón.

Los redactores de *NEJM*, sabedores de lo muy controvertido que iba a resultar ese artículo, convocaron una mesa redonda donde se debatiera si los médicos de Denver habían actuado correctamente. Sí lo hicieron, según Robert D. Truog, médico y bioético de Harvard, quien insistió en que el problema no nacía de la conducta de los cirujanos, sino de la norma que exige la muerte del donante. Truog sostuvo que esa norma debía derogarse, pues desvía el centro de la cuestión hacia minucias superficiales, como el número de segundos que han de transcurrir antes de poder iniciar un trasplante. A su juicio sólo importan dos cuestiones: ¿Sufre la persona lesiones tan graves que imposibilitan la recuperación? ¿Ha consentido su familia la donación de órganos? Si ambas respuestas son afirmativas, no existe diferencia ética entre la muerte por retirada del soporte vital y la muerte por extracción de órganos.

Otro de los participantes en la mesa redonda, el experto en bioética Arthur L. Caplan, de la Universidad de Pensilvania, no aceptó la tesis de Truog, por temor a la interpretación que le daría un público lego y desconfiado. "Hacer que la gente se pregunte si se le van a escatimar cuidados médicos para extraerle órganos y utilizarlos en otros nos situaría en un terreno muy peligroso", observa Caplan.

La supresión de la norma del "donante fallecido" comportaría azares éticos y políticos de consideración. Pero Truog insiste en que, con las debidas salvaguardas, la recuperación de órganos conservaría la eticidad. En concreto, los médicos habrían de tener la certeza absoluta de lo inminente e inevitable de la muerte. Deberían existir, además, garantías sólidas de que el sujeto o sus responsables legales han sido plenamente informados antes de dar el consentimiento. Sin embargo, puede que las salvaguardas resulten insuficientes. Tal paso desembocaría en un "caos moral y legal", escribía Edmund D. Pellegrino, de la Universidad Georgetown y presidente del Consejo Presidencial de Bioética de EE.UU., en el informe que dicho consejo había titulado *Controversias en la determinación de la muerte*. De aceptarse la propuesta de Truog —proseguía Pellegrino—, a la polémica ya existente sobre el suicidio asistido o la retirada del soporte vital a pacientes sumidos en coma de larga duración, se añadiría la eticidad de la donación de órganos.

Si el estamento médico llegase a prescindir de la regla del "donante fallecido" y se adoptase como norma la muerte por extracción de órganos, se produciría un desplazamiento en el delicado equilibrio entre la declaración de óbito y la obtención de órganos. Sobre su importancia sólo caben conjeturas. Parece razonable afirmar que en tanto se aplicaran con rigor las salvaguardas, nadie se convertiría en donante de órganos mientras tuviera posibilidades de recuperarse. A partir de entonces, podrían darse distintas situaciones. En una de ellas, una parte importante de los 7000 estadounidenses que cada año mueren en espera de un trasplante conservaría la vida, pues se dispondría de más órganos en mejores condiciones. En otra, la proporción de fallecidos aumentaría, ya que se agravaría la escasez de órganos por el temor de los donantes a verse despojados de ellos antes de estar muertos del todo.

Es esta incertidumbre sobre las soluciones de compromiso, sobre el trueque de la vida de un individuo por la de otro, lo que está haciendo tan complicado definir la muerte en el siglo XXI. Si al menos la definición nos indicara el momento de abandonar por fin las medidas terapéuticas y empezar el duelo, habríamos avanzado un paso. Con la donación de órganos cerniéndose sobre el cadáver, la cuestión resulta más compleja. La definición de muerte permitiría darle a otra vida en declive una segunda oportunidad, tras determinar en otra vida declinante su fin irremediable.

LA AUTORA



Robin Marantz Henig es colaboradora del *New York Times Magazine* y autora de ocho libros. Ha recibido premios de la Asociación Estadounidense de Escritores Científicos y de la Sociedad Estadounidense de Periodistas y Autores.

PARA SABER MAS

RETHINKING THE ETHICS OF VITAL ORGAN DONATIONS. Franklin G.Miller y Robert D. Truog. Informe del Centro Hastings, noviembre/diciembre de 2008. http://www.thehastingscenter.org/Publications/HCR/Detail.aspx?id=2822

CONTROVERSIES IN THE DETERMINATION OF DEATH. Informe del Consejo Presidencial de Bioética de EE.UU., diciembre de 2008. http://bioethics.georgetown.edu/pcbe/reports/death

ORGAN DONATION AFTER CARDIAC DEATH. Mesa redonda convocada por *New England Journal of Medicine*. http://content.nejm.org/cgi/content/full/359/7/669/DC1

MARK PETERSON *Corbis* (*operación*); CORTESIA DE JEFFREY R. HENIG (*Henig*)



El envejecimiento de la población española

España se halla inmersa en una revolución reproductiva que está cambiando la forma de la pirámide poblacional. Las causas de ello, una mayor supervivencia y la consecuente alteración de los roles tradicionales asociados al género y la edad, se insertan en lo que suele llamarse progreso

<< JULIO PEREZ DIAZ >>

CONCEPTOS BASICOS

- El término "envejecimiento demográfico" fue creado por corrientes natalistas con el propósito de calificar negativamente la modernización demográfica.
- La transformación de la pirámide de edades, con un peso creciente de los mayores, constituye un aspecto más de la revolución reproductiva actual.
- El detonante y motor de la revolución reproductiva es la generalización de la supervivencia hasta la vejez. Su principal beneficiaria es la mujer, en el pasado sobrecargada por la elevada fecundidad que exigía el reemplazo generacional.

La humanidad está experimentando una revolución reproductiva que le permite, por primera vez en la historia, disminuir la fecundidad (número de hijos por mujer). Ello se debe a que los recién nacidos tienen por delante una vida mucho más larga que sus antepasados. Ambas novedades, la democratización de una vida larga y la consecuente posibilidad de una menor fecundidad, se traducen en una nueva estructura de la pirámide poblacional. Se trata de un cambio brusco, todavía en curso y sin precedentes en las civilizaciones anteriores. Sus consecuencias políticas, económicas y sociales son enormes.

Sin embargo, esa transformación demográfica sigue analizándose según ideas del pasado. Cuando empezó a advertirse, allá por los albores del siglo xx y sólo en los países más desarrollados, la reacción fue de alarma y rechazo. El descenso de la fecundidad se identificó con la decadencia de Occidente o la degeneración nacional. El darwinismo, la novedad triunfante entonces, se tradujo en organicismo y biologismo aplicados a la demografía y la sociología. Se equipararon las sociedades a seres vivos, con sus mismas fases de juventud, madurez y declive. Desde entonces



1. CRECE LA PROPORCION de personas en edad madura o en su primera vejez. Estas generaciones prestan un notable servicio a la sociedad, pues contribuyen al cuidado de los nietos y de los mayores.



2. EL NUMERO DE MUJERES dobla el de hombres a los 80 años de edad.

hablamos de “envejecimiento demográfico” para referirnos al proceso que configura la nueva pirámide poblacional.

Pero las poblaciones no envejecen. No tienen edad. Durante el último siglo se ha demostrado que la “decadencia” predicha era una falacia. La trampa conceptual implícita en la denominación “envejecimiento demográfico” es una herencia de la que no nos hemos desprendido aún y que sigue ejerciendo su influencia. Es importante empezar con esta aclaración porque la población de España está experimentando dicha transformación con una intensidad y rapidez sin precedentes.

EL CAMBIO DE LA PIRAMIDE

En España crece la proporción de personas mayores de 64 años. Entre 1975 y 2010 ha pasado del 10 al 17 por ciento, y seguirá aumentando en las próximas décadas. Las pirámides poblacionales correspondientes a estos años no pueden ser más distintas.

En la pirámide de 1975, la Guerra Civil se hacía notar por la escasez numérica en torno a la franja comprendida entre los 25 y los 30 años de edad (lo mismo ocurría en Europa con la Segunda Guerra Mundial). Pero, a diferencia de otros países, España no recuperó la natalidad con el fin de la guerra. La dictadura y su aislamiento internacional se tradujeron en dos décadas de miseria y pocos nacimientos, pese al natalismo estatal. Llegó luego el *baby boom*. Los nacimientos batieron récords antes de iniciar un acusado descenso a partir de 1975; la base de la pirámide de ese año presenta una amplitud notable.

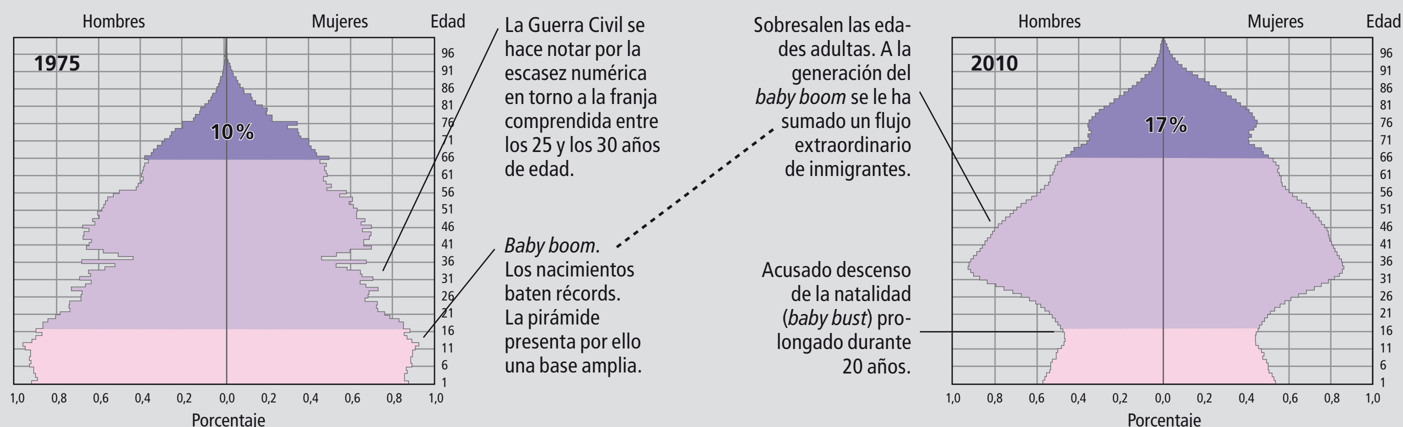
La pirámide de 2010 refleja, en cambio, un acusado descenso de la natalidad, prolongado durante 20 años. Sobresalen las edades adultas centrales (generaciones del *baby boom*), que además se han visto engrosadas con un flujo extraordinario de inmigrantes, sin precedentes en un país tradicionalmente emigratorio.

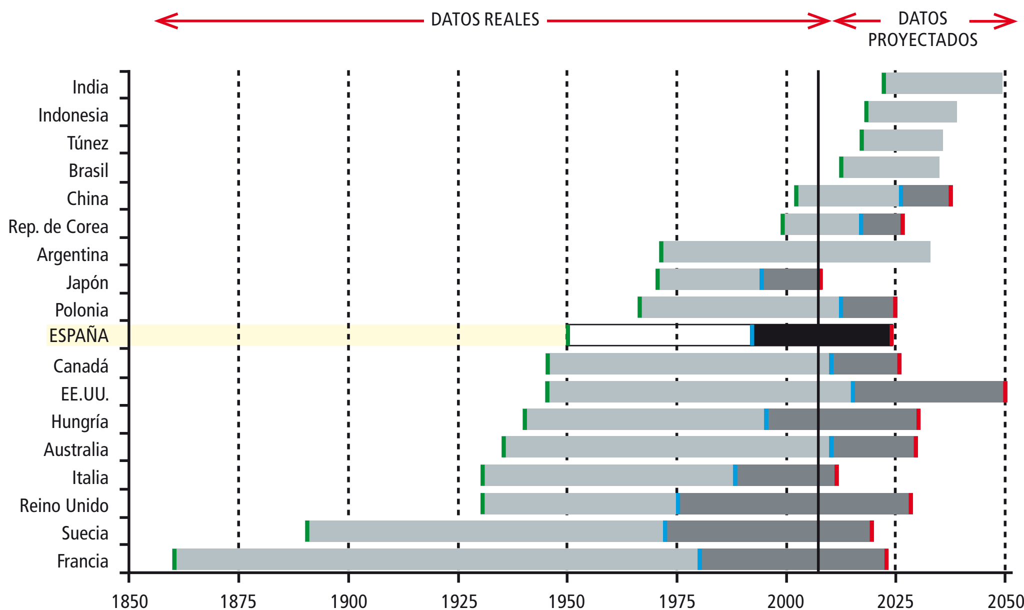
Si bien la comparación de esas dos pirámides puede inducir a pensar que el envejecimiento demográfico corresponde a un cambio de los últimos 30 años, ello no es así: nunca a lo largo del siglo xx dejó de aumentar la proporción de mayores. Ni siquiera durante el *baby boom*. Es cierto que el proceso se aceleró mucho después, durante el *baby bust* (caída de la natalidad) de final del siglo, pero las fluctuaciones de la natalidad no deben hacernos perder de vista el auténtico motor del cambio, que es el constante aumento de la supervivencia

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADISTICA, PADRON (*pirámide de 1975*); INE, *ESTIMACIONES DE LA POBLACION ACTUAL DE ESPAÑA* (*pirámide de 2010*)

LA NUEVA PIRAMIDE POBLACIONAL

La comparación entre la pirámide poblacional actual y la de hace sólo 35 años ofrece una clara imagen de la rápida transformación que ha sufrido la población española durante los últimos años (la proporción de mayores de 64 años ha pasado del 10 al 17 por ciento). Las causas de ese cambio se hallan en un aumento constante de la supervivencia generacional.





3. MOMENTO HISTORICO en que los mayores de 64 años alcanzan el 7 (*verde*), 14 (*azul*) y 21 (*rojo*) por ciento de la población, en España y diversos países del mundo (de los países que previsiblemente no alcanzarán el 21 por ciento antes de 2050 no se ha dibujado el segundo tramo). El paradigma del envejecimiento temprano y gradual se halla en Francia, que experimentó un descenso precoz de la mortalidad y la natalidad: su población mayor alcanzaba un peso del 7 por ciento ya en 1860 (la de España en 1950) y ha tardado ciento veinte años en elevarse hasta el 14 por ciento (España, sólo tres décadas).

generacional. Sólo en el último decenio se ha producido por primera vez una inversión de la tendencia; la proporción de mayores ha llegado a disminuir ligeramente. Se trata de un espejismo provocado por la elevadísima inmigración de jóvenes, acompañada de cierto repunte de la natalidad y la jubilación de las generaciones de escaso tamaño nacidas durante la Guerra Civil.

El espejismo, no obstante, se disipa rápidamente. Aunque la reciente crisis económica ha frenado la inmigración y está retrasando las uniones conyugales y la natalidad, pronto empezarán a jubilarse las generaciones nacidas en los años cincuenta y sesenta. Ello conllevará un crecimiento notable del peso de los mayores sobre el conjunto, que superará el 20 por ciento probablemente antes de los próximos quince años. No se trata de una tendencia coyuntural y pasajera, ni es una rareza. Lo mismo ocurre en casi todos los países desarrollados. Las principales diferencias deben buscarse en el momento histórico en que se inició el proceso y el punto en que se encuentra actualmente.

El paradigma de inicio temprano y proceso gradual se halla en Francia, cuya mortalidad y fecundidad empezaron a descender de forma muy precoz. Ya en 1860 su población mayor había alcanzado un peso del siete por ciento (España no lo consiguió hasta 1950) y ha tardado 120 años en elevarlo hasta el catorce por ciento (en España ha ocurrido en apenas tres décadas).

Se ha difundido la creencia de que España es uno de los países más envejecidos de Europa y del mundo. Sin embargo, esta idea, construida a finales de los años noventa, cuando más acelerado era el ritmo de envejecimiento demográfico, es falsa. Si las proyecciones de población prolongaban indefinidamente las tendencias del momento, acababan en efecto con una España que batía récords de población mayor en un horizonte de medio siglo. Pero las proyecciones de tendencias son simples herramientas exploratorias, no predicciones. Es bien conocido por los demógrafos que las tendencias se comportan de forma cíclica, no lineal. En la actualidad, el peso de los mayores en España es muy similar al del conjunto europeo e inferior al que ya alcanza en países de gran peso como Alemania o Italia (*véase la figura 3*). El extraordinario descenso de la natalidad iniciado en 1975 tocó fondo a mediados de los noventa, para invertirse después durante más de un decenio.

En definitiva, España es tardía, pero rápida. De "segunda oleada", como Japón o Polonia, pero muy adelantada respecto a los que se incorporaron a este proceso sólo a partir de la segunda mitad del siglo XX. Algunos ni siquiera han llegado todavía al siete por ciento, aunque evolucionen en esa dirección. Se trata de países de América, Asia y, sobre todo, Africa, en donde este retraso coincide con un desarrollo económico y social tardío y escaso.



La proporción de mayores ha pasado, en un siglo, del **4** al **18** por ciento

LAS CONSECUENCIAS

El cambio de la pirámide poblacional entraña consecuencias en todos los ámbitos sociales. Algunas son automáticas: se trata de los "efectos de estructura". Entre ellos destacan la feminización, el sobreenvejecimiento y el aumento de la dependencia.

La feminización de la población se debe a la ancestral diferencia de mortalidad entre hombres y mujeres, que desequilibra la relación numérica entre ambos sexos a medida que la población envejece. A los 80 años, las mujeres doblan a los hombres. Antaño, estas diferencias no tenían demasiada importancia. Hoy, las mujeres de 65 años o más alcanzan una décima parte de la población total española.

Conforme se generaliza la supervivencia hasta la primera vejez, se produce un sobreenvejecimiento: cada vez es mayor el número de personas que alcanza edades

BASADO EN "THE DEMOGRAPHY OF POPULATION AGEING", B. MIRKIN Y M. B. WEINBERGER, *POPULATION BULLETIN OF THE UNITED NATIONS* 42/43: 37-53 (2001). DATOS ACTUALIZADOS A PARTIR DE "WORLD POPULATION PROSPECTS: THE 2006 REVISION", EN SUS HIPOTESIS MEDIAS (*arriba*)

muy avanzadas. Puesto que en el pasado la supervivencia hasta esas edades era muy escasa, ahora es el grupo que crece con mayor rapidez.

Dado que los problemas de salud guardan una relación directa con la edad, el envejecimiento demográfico causa el aumento de los mismos. En un país tan apoyado en la solidaridad familiar como España, el creciente peso del cuidado a los dependientes ha debido abordarse como asunto de Estado. En 2006, la Ley de Dependencia creó una cuarta "pata" del estado de bienestar español, junto a la sanidad, la educación y las pensiones.

La nueva pirámide poblacional afecta también a otros ámbitos sociodemográficos. Las formas de convivencia y las estructuras de los hogares son distintas en cada edad, de manera que la nueva pirámide implica mayor peso de los hogares que característicos de la vejez, con lo que disminuye el tamaño medio de los hogares españoles.

Todos esos cambios suelen verse con temor. De hecho, sirven a menudo para prever graves problemas para las pensiones de vejez, la atención sanitaria, la prestación de cuidados por parte de los familiares o la competitividad del mercado laboral. Según las proyecciones de población, en apenas dos décadas España alcanzará su porcentaje récord de personas mayores; ello coincidirá con la jubilación de las generaciones centrales del *baby boom*, que superarán la cuarta parte de la población total.

MODELOS QUE FALLAN

El problema de esas proyecciones es que predicen los cambios de una variable en igualdad del resto de las condiciones. Sin embargo, el cambio que estamos describiendo en este caso (el de la pirámide poblacional) sería imposible sin la modificación de muchas otras condiciones. Los problemas derivados del envejecimiento demográfico vienen prediciéndose de forma equivocada desde hace un siglo.

Dicho alarmismo se ha convertido en marca de ciertas escuelas de pensamiento, que han perdurado pese a la invalidez de su discurso, desmentido desde hace ya casi cien años. Hallamos un buen ejemplo de ello en la corriente iniciada en Francia, en plena fiebre natalista, por demógrafos como Alfred Sauvy o Fernand Boverat, y mantenida por su alumno Gérard-François Dumont, a quien debemos el exitoso concepto de "invierno demográfico".

Para comprender el modo en que ha cambiado el resto de las condiciones que rodean a la estructura demográfica por edades, debemos considerar también los cambios que ha sufrido la significación de cada edad. Para empezar, los adultos trabajadores no producen la misma riqueza hoy que hace medio siglo. En los años sesenta, todavía un tercio de los trabajadores españoles estaba ocupado en el sector agrario, muy poco productivo y con una proporción elevadísima sin afiliación a la Seguridad Social.

Cuando se calcula la sostenibilidad de la Seguridad Social se considera sólo la relación entre la población en edad "productiva" y la población en edad "improductiva". Pero lo que resulta determinante no son esas cifras, sino la productividad de los trabajadores (la Seguridad Social ingresará más dinero si éstos tienen mejores empleos, por hallarse en un sector más productivo). De ahí que hoy nos hallemos ante una situación en apariencia paradójica: pese a que la relación numérica entre pensionistas y trabajadores es la "peor" de nuestra historia (nunca antes había habido tantos pensionistas), el sistema de pensiones se halla más consolidado que nunca.

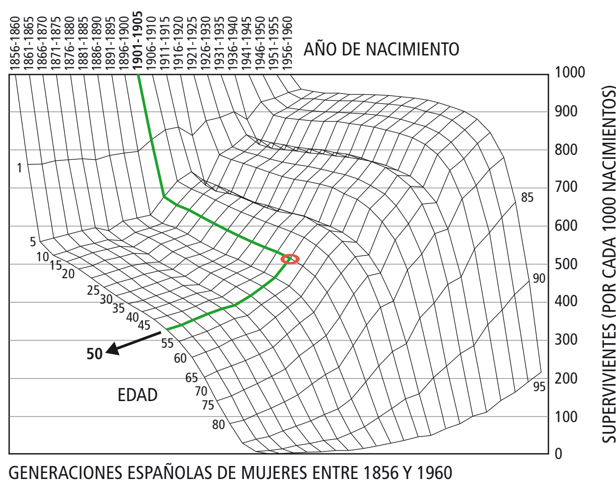
Especial interés revisten las características de las generaciones que cumplen los 65 años de edad: los "nuevos viejos" españoles, con mucho retraso respecto a lo ocurrido en otros países desarrollados, están revolucionando el perfil sociológico tradicional de la vejez. Están cumpliendo 65 años las generaciones que, por primera vez, consiguieron la plena escolarización,

EL AUTOR

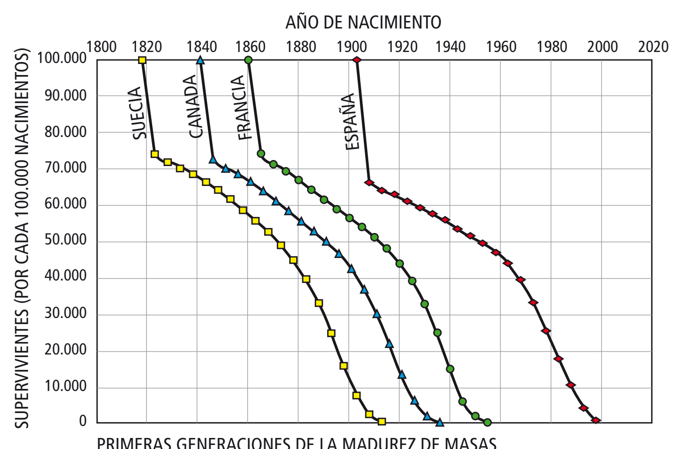


Julio Pérez Díaz es demógrafo y doctor en sociología. Desarrolla su labor en el grupo de investigación de dinámicas demográficas del CSIC y anteriormente en el Centro de Estudios Demográficos. Estudia las políticas de población, el envejecimiento demográfico y la sociología de la vejez.

4. LA MADUREZ DE MASAS se logra cuando las generaciones consiguen sobrevivir mayoritariamente hasta los 50 años de edad. Se considera entonces que los progenitores viven el tiempo necesario para completar la crianza de los hijos. En España se alcanzó este umbral en las generaciones femeninas nacidas entre 1901 y 1905, mujeres que cumplieron los 50 ya en la segunda mitad del sigloxx (*izquierda*). El ritmo que ha seguido esta "modernización social" varía de un país a otro (*derecha*). Suecia destaca por la precocidad con que las primeras generaciones consiguieron democratizar la supervivencia hasta umbrales críticos de edad y, por tanto, aumentó la eficiencia reproductiva.



GENERACIONES ESPAÑOLAS DE MUJERES ENTRE 1856 Y 1960



PRIMERAS GENERACIONES DE LA MADUREZ DE MASAS

CORTESIA DEL AUTOR

disfrutaron de una vida adulta y laboral sin interrupciones bélicas, vieron cómo el trabajo agrario o el origen rural dejaban de ser mayoritarios, y disfrutaron del consumo de masas de automóviles, electrodomésticos y otros productos.

Reviste, pues, suma importancia ahondar en la espectacular modernización internacional que han sufrido las dinámicas poblacionales, pues el envejecimiento de la pirámide constituye sólo una de sus expresiones.

LA REVOLUCION REPRODUCTIVA

Son los sistemas demográficos en su conjunto los que vienen cambiando desde hace unos dos siglos. Frente al concepto de transición demográfica, que describe sólo el cambio sin explicar sus causas, varios autores hemos propuesto la teoría de la revolución reproductiva. Consideramos que lo que han conseguido los países desarrollados, y están en camino de conseguir prácticamente todos los demás, es un salto cualitativo en la eficiencia de sus sistemas demográficos.

Las analogías que proporciona la teoría general de sistemas resultan de gran utilidad aquí. Para conservarse, todo sistema abierto, sea cual sea su organización interna, debe evitar la degradación y el aumento de la entropía. Para ello incorpora elementos externos de duración limitada, que deben ser renovados. Lo mismo sirve para una población humana, si la entendemos como un "sistema demográfico": se alimenta de nacimientos y de inmigración, con lo que logra mantener la población a pesar de que sus integrantes, los humanos, morimos irremediablemente.

La mayor o menor eficiencia de un sistema depende de la relación entre los resultados que consigue y los elementos de producción que requiere. Vistas así, las poblaciones humanas han sido siempre poco eficientes. Han sacado un escaso rendimiento reproductivo a las nuevas vidas que traían al mundo. Para mantenerse, necesitaban una ingente cantidad de nacimientos que, en su mayor parte, no llegaban a la edad fecunda. Podían equipararse a un motor de combustión que quemaba mucho combustible pero perdía gran parte de la energía producida sin convertirla en trabajo.

Un número elevado de hijos y una vida corta daban forma a la pirámide: muy amplia en la base, se estrechaba rápidamente. Las edades maduras y avanzadas tenían un peso escaso. Eran pirámides "jóvenes". Pero también determinaban las relaciones de género, las organizaciones familiares y los flujos de recursos y cuidados entre generaciones. La vida era difícil para los humanos hasta hace bien poco.

A finales del siglo XVIII, las cosas empezaron a cambiar en algunos lugares de Europa. Por diversos motivos, la elevada y azarosa mortalidad, típica de la historia humana anterior, empezó a disminuir. Comenzó a acelerarse el crecimiento demográfico. Las pirámides de población rejuvenecieron más todavía, al ser la mortalidad infantil la primera en reducirse.

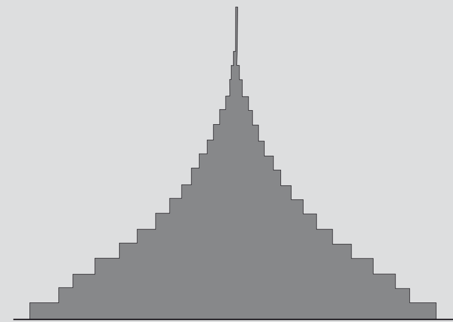
Sólo cuando se consolidaron las mejoras de la supervivencia reaccionaron de forma adaptativa los comportamientos reproductivos de la siguiente generación. La fecundidad inició entonces el descenso que ha conducido hasta las bajísimas tasas actuales.

La teoría de la transición demográfica se ha criticado por ser una mera generalización empírica, sin capacidad explicativa. Sin embargo, describe un cambio trascendental para la humanidad. Si abandonase su concepción de las poblaciones

LA REVOLUCION REPRODUCTIVA

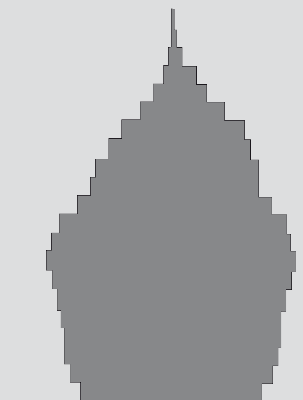
La teoría de la revolución reproductiva aplica a las poblaciones humanas la teoría general de sistemas. Estas pasan a considerarse "sistemas poblacionales", que necesitan "alimentarse" de nacimientos y de inmigración para mantener la población. Se describen las poblaciones en términos de "eficiencia reproductiva", es decir, la relación entre los resultados que consigue y los elementos de producción que requiere.

Vistas así, las poblaciones humanas han sido, durante la mayor parte de la historia de la humanidad, poco eficientes (*arriba*). Sin embargo, a finales del siglo XVIII la situación cambió en algunos países de Europa. La mortalidad empezó a disminuir y comenzó a acelerarse el crecimiento demográfico. Las pirámides de población inicialmente rejuvenecieron. Las mejoras de la supervivencia terminaron por modificar los comportamientos reproductivos de la siguiente generación. La natalidad inició entonces el descenso que ha conducido hasta las bajísimas tasas actuales, características de los países más desarrollados (*abajo*).



POBLACION POCO EFICIENTE

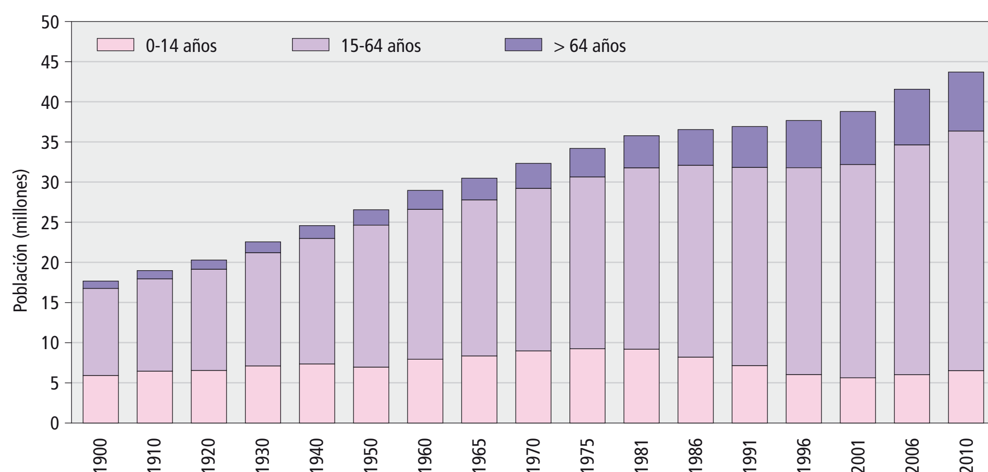
- Natalidad elevada (muy por encima de los dos hijos por mujer teóricamente necesarios para el reemplazo generacional).
- Mortalidad infantil y juvenil elevadas (la mayoría de la población no llega a la edad fecunda).
- Pirámide poblacional "joven": base amplia y peso escaso de las edades maduras y avanzadas.



POBLACION EFICIENTE

- Natalidad baja.
- Mortalidad infantil y juvenil bajas.
- Supervivencia mayoritaria hasta las edades fértiles.
- Supervivencia mayoritaria hasta las edades maduras (madurez de masas).
- Pirámide poblacional "madura": base estrecha y peso notable de las edades maduras y avanzadas.

CORTESIA DEL AUTOR



5. POBLACION DE ESPAÑA entre 1900 y 2010, distribuida en los grandes grupos de edad y en números absolutos.

como simples *stocks* (apoyada sólo en tasas de mortalidad y natalidad anuales y simultáneas) y atendiese a los cambios reproductivos entre generaciones, tendría pleno sentido hablar de la mayor o menor eficiencia con que se reproducen las poblaciones. Esto es lo que incorpora la teoría de la revolución reproductiva.

Desde un punto de vista estrictamente demográfico, esa eficiencia aumenta cuando se "democratiza" la supervivencia generacional hasta edades umbrales para la reproducción. En primer lugar, resulta fundamental asegurar la supervivencia mayoritaria hasta las edades fértiles; de nada sirven natalidades elevadas si la mayor parte de los nacimientos no sobrevive hasta tener, a su vez, la oportunidad de contribuir a la reproducción. Luego, es igualmente básico generalizar la supervivencia hasta las edades maduras, puesto que la reproducción mejora si los progenitores viven el tiempo necesario para completar la crianza de los hijos (madurez de masas). Aunque se trate de "metas" en apariencia limitadas al campo de la mortalidad, conseguirlas resulta crucial para incrementar la eficiencia global de un sistema reproductivo.

En toda la historia humana previa a la revolución reproductiva, sólo una pequeña parte de la población infantil llegó a vivir lo suficiente para poder tener hijos. La mayor parte moría mucho antes. La mortalidad estuvo siempre por encima del 20 por ciento en el primer año de vida; durante la infancia posterior, proseguía la erosión. El 50 por ciento había muerto mucho antes de llegar a la edad reproductiva.

En tales condiciones, resulta evidente que la fecundidad de los supervivientes (minoritarios) debía ser alta, muy por encima de los dos hijos por mujer teóricamente necesarios para el reemplazo generacional. Y pese a fecundidades tan elevadas, el resultado era muy pobre en términos de reproducción, con un ritmo de crecimiento poblacional prácticamente nulo. La "ineficiencia" del sistema tiene aquí un sentido literal: mucha inversión y escaso rendimiento. Por tanto, las tradicionales pirámides jóvenes que acompañan a la historia de la humanidad constituyen una expresión de atraso e ineficiencia reproductiva.



El envejecimiento demográfico ha constituido el principal estímulo para la investigación médica y farmacológica

Esa ineficiencia condicionaba muchos otros ámbitos de las relaciones sociales, empezando por las relaciones de género. En el pasado, el esfuerzo reproductivo de las mujeres era de tal intensidad que siempre constituyó su principal ocupación y el ancestral núcleo definidor de la propia feminidad. Determinaba también las opciones de vida y las empresas colectivas. Los proyectos individuales no tenían sentido. El individuo aislado se consideraba inviable.

Igualmente, las formas de convivencia estaban rígidamente condicionadas. Se maximizaba la descendencia mediante un frágil equilibrio de los recursos disponibles, escasos e inestables; ello generaba formas familiares extensas y complejas. Las parejas carecían de los medios y la seguridad suficiente para abordar la empresa familiar en solitario. Por otra parte, las estructuras extensas y complejas eran difícilmente evitables, teniendo en cuenta la elevada probabilidad de morir "antes de tiempo" para cualquiera de los adultos de la familia.

Las anteriores condiciones estructurales cambian cuando la supervivencia empieza a generalizarse. La democratización de la vida hasta edades juveniles constituye un factor de éxito reproductivo; las poblaciones crecen más rápido con un mismo número de nacimientos si sus "inquilinos" permanecen durante más tiempo.

La democratización de la vida hasta edades maduras supone otro umbral de eficiencia. Por un lado, permite criar mejor a los hijos. Por otro, es un éxito que se retroalimenta: al aumentar la proporción de cada generación que sobrevive hasta edades fértiles, puede disminuir la cantidad de hijos que debe tener cada uno para asegurar un determinado volumen poblacional. Se distribuye entre más personas el trabajo de "producir" y criar la siguiente generación.

FUENTE: INE, CENSOS, PADRONES Y RENOVACIONES PADRONALES CORRESPONDIENTES (*gráfica*); © *iStockphoto*/DANIEL GRILL (*investigadora*)

Tener menos hijos y en mejores condiciones cierra el círculo virtuoso. Las nuevas generaciones, mejor cuidadas y atendidas, viven aún más años. Una circularidad de factores retroalimentados que conduce a la exitosa y eficiente dinámica poblacional actual. Y también, claro está, a una pirámide de población completamente nueva.

LA SITUACION EN ESPAÑA

España parece un caso extremo de rápido envejecimiento demográfico. Pero toda su demografía es igualmente extrema. En los albores del siglo XX, la esperanza de vida no llegaba a los 35 años (muchos países europeos superaban ya los 50 años); un siglo después, con más de 80 años, se sitúa entre las más altas del mundo.

Las mejoras generacionales en materia de supervivencia son de una rapidez espectacular. Sólo así se explica la eficiencia reproductiva conseguida y, por tanto, la posibilidad de reducir la natalidad hasta extremos nunca antes vistos, pese a que el volumen total de la población española no ha hecho más que aumentar, y muy por encima de las previsiones. La madurez de masas, umbral ya mencionado por el que las generaciones sobreviven mayoritariamente hasta los 50 años de edad, se consigue en España por primera vez en las generaciones femeninas nacidas entre 1901 y 1906, mujeres que cumplieron los 50 ya en la segunda mitad del siglo XX.

Mucho se ha especulado sobre los factores históricos o culturales responsables de la precocidad con que algunos países nórdicos o anglosajones adoptaron las nuevas formas de familia o de pareja. Es lo que hoy se conoce como la "segunda transición demográfica". La baja fecundidad de Suecia y su elevada ocupación femenina se contraponían a las arcaicas pautas españolas que operaban todavía en el decenio de los setenta. Las explicaciones se buscaron siempre en sus peculiaridades políticas, ideológicas, culturales e, incluso, religiosas. Poca importancia se dio, en cambio, a la precocidad con que las primeras generaciones suecas consiguieron democratizar la supervivencia hasta umbrales críticos de edad, con su consecuente efecto en la eficiencia reproductiva.

Cualquier manual básico de análisis demográfico explica que los indicadores generales de natalidad vienen a ser una ficción instrumental. Construyen una generación hipotética de mujeres "inmortales" y nos dicen cuántos hijos tendrían si, en el transcurso de su vida, a cada edad tuvieran hijos con la misma intensidad que han procreado las mujeres de esa edad a lo largo de un año cualquiera. Se ignora así cuántas de las mujeres de esa generación hipotética habrían sobrevivido desde el nacimiento hasta la pubertad, cuántas morirían durante su vida fecunda, cuánto tiempo vivirían después de ser madres o cuánto tiempo vivirían los hijos que alumbraran. La demografía hace "análisis" y separa la fecundidad en "estado puro" de los otros determinantes que afectan a la reproducción, sobre todo la mortalidad.



AURORA VALL CASAS

CONSECUENCIAS SOCIALES

El envejecimiento de la población entraña importantes consecuencias para la estructura social. Las más inmediatas:

FEMINIZACION: La diferencia de mortalidad entre hombres y mujeres desequilibra la relación numérica entre sexos.

SOBREENVEJECIMIENTO: Crece el número de personas que alcanza edades muy avanzadas.

MAYOR DEPENDENCIA: Dado que los problemas de salud guardan una relación directa con la edad, aumenta la morbilidad.

España proporciona buenos ejemplos de la diferencia entre fecundidad y reproducción: las generaciones femeninas nacidas entre 1871 y 1875 tuvieron más de 4,5 hijos por mujer, pero su reproducción generacional apenas superó el reemplazo (una hija por cada mujer nacida en la generación de su madre). Con la mejora de la supervivencia ocurrió que las generaciones de entre 1936 y 1940 consiguieron la misma tasa de reproducción pero con casi dos hijos menos por mujer (2,6). Esta mayor eficiencia reproductiva explica que España, después del escaso crecimiento del siglo XIX, y tras un siglo XX de constante descenso de la natalidad, haya pasado de 18 a más de 40 millones de habitantes.

En definitiva, el envejecimiento demográfico no es más que el resultado de una mejor manera de mantener las poblaciones humanas, más eficiente en el rendimiento obtenido por cada nueva vida traída al mundo. El descenso de la fecundidad se explica en ese contexto, al menos desde un punto de vista histórico. Nos centramos demasiado en las pequeñas diferencias, de décimas a veces, en la fecundidad de los países más desarrollados. Y con demasiada frecuencia se buscan las explicaciones en determinantes extrademográficos y culturales. Pero la modernización de la natalidad y la estructura por edades no pueden considerarse cuestiones coyunturales, accidentales o que resulten de recientes políticas fiscales o familiares, precios de la vivienda, condiciones del mercado de trabajo o pautas de relación entre los jóvenes. Resultan de un cambio a gran escala en la supervivencia y la reproducción humanas, que seguirá acentuándose en los próximos decenios, y que nos conduce de forma irreversible a un nuevo equilibrio poblacional.

CONCLUSIONES

Este artículo pretende huir del alarmismo reiterado sobre las consecuencias sociales, políticas y económicas del envejecimiento demográfico. Tales alarmas se fundamentan en previsiones que nunca se han cumplido. Previsiones erróneas que nadie se ha visto obligado a explicar porque se integran en el "consenso" dominante en el campo de la demografía. Pero en ciencia los errores deben servir para revisar los supuestos de partida y obtener nuevas previsiones. Debería aclararse por qué el envejecimiento demográfico guarda una correlación casi perfecta con los niveles de riqueza y bienestar internacionales, y no con la pobreza. España, desde luego, no desmiente esta relación, sino todo lo contrario: no ha hecho más que prosperar mientras la proporción de mayores pasaba de apenas el 4 por ciento de hace un siglo al 18 por ciento actual.

El cambio demográfico en España ha facilitado una mayor inversión social y familiar en los hijos, lo que ha conllevado un aumento notable del capital humano y social. Ello ha

hecho más productiva la economía y ha abierto una nueva y abundante cantera de mano de obra, la femenina, ahora menos obligada a las tareas reproductivas. Ni siquiera es cierto que la nueva pirámide poblacional sobrecargue los sistemas sanitarios. Son los cambios en las pautas de consumo y la modernización de tales sistemas los que explican la mayor parte del incremento en el gasto sanitario en los países desarrollados. En todo caso, el envejecimiento demográfico ha constituido el principal estímulo para la investigación médica y farmacológica contemporáneas; basta con observar la lista de galardonados con el premio Nobel de medicina en los dos últimos decenios para constatar que son las enfermedades degenerativas de los sistemas circulatorio y nervioso las que ocupan la punta de lanza de nuestro progreso sanitario.

La nueva pirámide conlleva también un mayor equilibrio entre las edades, lo cual tiene consecuencias positivas para la economía productiva. Un perfil de usuarios y consumidores más diverso hace más estables los mercados frente a las crisis sectoriales; además, la nueva vejez está abriendo sectores de consumo y de servicios fundamentales para la economía de todos los países demográficamente evolucionados.

Lo que se ha alargado no ha sido la vejez, sino la juventud. Quienes nacieron en España a principios del siglo xx empezaron a trabajar a una edad promedio de 13 años y se convirtieron en adultos muy pronto, y en viejos también. Hoy en España se considera joven a una persona de 40 años. Ello guarda una relación directa con el apoyo y los recursos que los mayores transfieren a los más jóvenes, y con el simple hecho de que permanezcan vivos muchos más años. En un país con un estado del bienestar poco desarrollado y muy apoyado en la ayuda familiar, la proporción creciente de personas en edad madura o en su primera vejez ha sido de gran ayuda para el resto de edades. Son esas generaciones las que contribuyen a la sociedad mediante el cuidado de los nietos (ante la falta de ayudas públicas para la conciliación laboral y familiar, servicios de cuidados o guarderías) y de los mayores. Ha aparecido, por tanto, un nuevo actor social con un peso demográfico creciente que ha abierto nuevas posibilidades de relaciones y estrategias familiares. Pero, sobre todo, se ha democratizado la supervivencia hasta la vejez, lo que transforma por completo los ciclos vitales. No nos hallamos ante una repetición de antiguas decadencias como la del Imperio romano, ni ante el abandono juvenil de las zonas rurales. Asistimos al mayor triunfo de la humanidad desde sus inicios. No lo recibamos con miedo.

PARA SABER MAS

EL FIN DEL ENVEJECIMIENTO. Tom Kirkwood. Editorial Tusquets, 1999.

LA MADUREZ DE MASAS. J. Pérez Díaz. Imserso; Madrid, 2003.

THE REPRODUCTIVE REVOLUTION. J. MacInnes y J. Pérez Díaz en *The Sociological Review*, vol. 57, n.º 2, págs. 262-284; 2009.

¿DECLIVE O REVOLUCION DEMOGRAFICA? F. C. Billari y G. Dalla Zuanna. Colección Monografías n.º 272. Centro de Investigaciones Sociológicas; Madrid, 2010.

APUNTES DE DEMOGRAFIA. Blog del autor. Contiene sus publicaciones, una sección temática sobre envejecimiento demográfico, apuntes de actualidad y material docente sobre demografía. http://apuntesdedemografia.wordpress.com

PORTAL MAYORES. Portal sobre vejez y envejecimiento, fruto de la colaboración entre el IMSERSO y el CSIC. http://www.imsersomayores.csic.es



Y en polvo nos convertiremos

La breve y compleja transformación de un cadáver humano

<< ARPAD A. VASS >>

CONCEPTOS BASICOS

- Después de la muerte, la descomposición del cuerpo humano se sucede en cuatro fases.
- La fase final, de reducción esquelética, puede completarse muy pronto, al cabo de tan sólo dos semanas del fallecimiento, o prolongarse hasta dos años después, dependiendo de la temperatura, la humedad y otras condiciones ambientales del lugar donde yace el cuerpo.
- Los cadáveres desprenden una variedad sorprendente de compuestos, desde benceno hasta freón, que ayudan a los científicos forenses a localizar tumbas clandestinas.

Bienvenida o no, la muerte constituye una parte natural del ciclo de la vida. Con la muerte se inicia un proceso complejo por el que el cuerpo humano se convierte gradualmente en polvo, lo que había sido antes. En el lenguaje forense, la descomposición transforma nuestras estructuras biológicas en componentes básicos sencillos, orgánicos o inorgánicos, que las plantas y los animales pueden aprovechar.

El fin de la desintegración y el ritmo al que se produce dependen principalmente de cuatro factores. El más importante es la temperatura: la velocidad de las reacciones químicas que tienen lugar en un cadáver se duplica con cada aumento de 10 ºC. La humedad o el agua del ambiente amortiguan esas reacciones y retrasan sus efectos. La acidez o la alcalinidad extremas aceleran la degradación enzimática de las moléculas biológicas, aunque la abundancia de agua frena asimismo la alteración. Finalmente, si se evita el contacto del cuerpo con el oxígeno, como cuando está enterrado, sumergido en agua o situado a gran altitud, la descomposición dura también más. Según la interacción entre esos cuatro factores, un cuerpo puede convertirse en un esqueleto en tan sólo dos semanas o tardar más de dos años en hacerlo.

Los especialistas forenses emplean sus conocimientos de biología y de química de la descomposición, además de las variables que afectan a la velocidad de desintegración, para calcular el momento del fallecimiento de una persona y para ayudar a los investigadores a descubrir tumbas clandestinas. Médicos y expertos en bioética pueden discordar en la definición de ese momento, pero conocen con detalle las fases de la descomposición de un cuerpo, que se describen a continuación. Los tiempos indicados son aproximados y toman como referencia un cuerpo yacente al aire libre. Si el cuerpo se ha enterrado desnudo en el suelo o en un ataúd, esos intervalos podrían alargarse bastante.

FOTOGRAFIAS DE GRANT DELIN



1. CUERPOS CEDIDOS a la ciencia, expuestos a la intemperie en la "Granja de cuerpos" de la Universidad de Tennessee para que los investigadores puedan estudiar las cuatro fases de la descomposición, que se inicia con la fase reciente (*en la foto*).

FASE 1: RECIENTE O CROMATICA DIAS 1 A 6

En la primera fase, los tejidos blandos empiezan a descomponerse en una cadena de acontecimientos que se inicia con la autolisis o autodigestión. Cuando cesan la respiración y la circulación, las células se ven privadas de oxígeno. Sobreviven así desde unos minutos hasta varios días, pero ya no pueden expulsar los desechos al torrente circulatorio. Uno de ellos, el dióxido de carbono, es de carácter ácido; al irse acumulando, aumenta la acidez en el interior de la célula, lo que causa la destrucción de las membranas celulares. Primero suelen disolverse las membranas sencillas de los lisosomas, orgánulos cargados de enzimas digestivas que la célula usa para desintegrar moléculas orgánicas. Al esparcirse, las enzimas empiezan a digerir la célula desde dentro hacia fuera; acaban originando pequeñas vesículas en el interior de los tejidos y órganos internos, o sobre ellos, así como en la superficie de la piel.

Al romperse las vesículas, los fluidos confieren a la superficie cutánea un brillo de aspecto húmedo. Las células más profundas de la piel empiezan a desprenderse; ello causa el deslizamiento de la piel, uno de los primeros signos visuales repulsivos de la descomposición.

Pocas horas después del fallecimiento comienzan a sucederse otros fenómenos. Los músculos adquieren rigidez (*rigor mortis*) —primero en los párpados, mandíbula y cuello— debido a que las células ya no bombean iones de calcio, el mecanismo que mantiene los músculos flexibles. Durante algún tiempo, las células musculares continúan convirtiendo los nutrientes en energía, pero al carecer de oxígeno se produce ácido láctico, que también causa la contracción de los músculos. La coagulación del interior de la célula, provocada por la acidez creciente, contribuye asimismo a la rigidez. El *rigor mortis* alcanza su máximo a las 24 horas, pero, a medida que las células sucumben a la autolisis, los tejidos se aflojan.

El cuerpo empieza también a enfriarse (*algor mortis*), a un ritmo de unos 0,8 ºC por hora, hasta alcanzar la temperatura ambiental. El *algor mortis* dependerá, naturalmente, de la ubicación y el tamaño del cuerpo, el vestuario y las condiciones climáticas.

Una o dos horas después del óbito, los glóbulos rojos y blancos de la sangre van sedimentándose por efecto de la gravedad (*livor mortis* o lividez cadavérica). Como consecuencia, la epidermis adquiere poco a poco un tono amoratado, excepto en las zonas que se hallan comprimidas, como la piel en contacto con el suelo. La máxima coagulación se produce entre las 6 y las 12 horas de la muerte. El aspecto marmóreo aparece después de varios días, cuando las proteínas y la sangre se descomponen y se liberan compuestos ricos en azufre, responsables en parte del hedor del cadáver.

FASE 2: ENFISEMATOSA DIAS 24 A 50

Transcurrida una semana, la liberación de los fluidos ricos en nutrientes estimula la aparición de un ejército de microorganismos que continúan la licuefacción de los tejidos blandos. Bacterias, hongos y protozoos (del propio cuerpo o del entorno) atacan los tejidos y forman múltiples gases, entre ellos dióxido de carbono, metano, sulfuro de hidrógeno, amoníaco y diversos compuestos orgánicos volátiles, como el benceno. Dado que en el intestino existe la mayor concentración de microorganismos del cuerpo, allí se produce la hinchazón o distensión más evidente. Los gases atrapados acaban saliendo por el recto o incluso llegan a desgarrar la pared intestinal.

FASE 3: DESCOMPOSICION ACTIVA DÍAS 24 A 50

En esta fase, los insectos (coleópteros y larvas de moscas) y algunos carnívoros se unen a los microorganismos en la tarea de eliminar los restos de tejidos. Gran parte de la masa muscular y las grasas del cuerpo han quedado reducidas a una sustancia fétida, pastosa y semifluida. Si los tejidos han permanecido en contacto con el aire, alcanzarán un *p*H superior a 9,0, muy básico (7,0 corresponde a un *p*H neutro). Si el cadáver ha estado enterrado y han predominado las condiciones anaeróbicas (sin oxígeno), el cuerpo presentará un *p*H ácido (inferior a 7,0). Cuanto más extremo sea el *p*H, más rápida será la descomposición.

Si existen condiciones de alcalinidad, además de una temperatura y humedad elevadas, los lípidos (principalmente los triglicéridos) experimentarán la saponificación, una reacción química que da lugar a la adipocera. (La reacción constituye la base de la fabricación de jabón a partir de grasa animal.) El color de la adipocera varía de blanquecino a amarillo oscuro, con alguna que otra zona parduzca. Puede mostrar asimismo diversas consistencias: dura y quebradiza si la descomposición avanza deprisa, o blanda y pastosa si lo hace más despacio. Si la adipocera cubre algún tejido en descomposición, se creará un ambiente anaeróbico que protegerá el tejido de sus alrededores y retrasará el proceso, con lo que la licuefacción puede demorarse años en aquella zona.

FASE 4: REDUCCION ESQUELETICA DIAS 51 A 64

En esta etapa (también denominada fase seca), se eliminan los últimos restos de tejido hasta quedar sólo el esqueleto humano. Los olores han desaparecido y la desfiguración ha terminado. Empieza entonces la diagénesis, o descomposición de los huesos, que puede durar desde varios años hasta decenios. El hueso presenta dos componentes principales: una proteína, el colágeno, y un mineral, la hidroxiapatita. Al degradarse primero la proteína, el material esquelético remanente se quiebra y descama con facilidad. Cuando la proteína desaparece, las heladas y el deshielo, la humedad ambiental, los carnívoros y la erosión fragmentan el esqueleto y lo reducen a polvo. Pero si los huesos yacen en un suelo muy seco que además contiene ciertos minerales, éstos últimos ocuparán las grietas y los espacios vacíos y se unirán a la hidroxiapatita. La combinación de los minerales permitirá la fosilización del esqueleto, que superará así los estragos del tiempo.

EL AUTOR



Arpad A. Vass es investigador del Laboratorio Nacional de Oak Ridge y profesor de antropología forense en la Universidad de Tennessee. En Oak Ridge desarrolló una base de datos para el análisis de los olores de la descomposición.

CORTESIA DE ARPAD A. VASS

PARA SABER MAS

BEYOND THE GRAVE: UNDERSTANDING HUMAN DECOMPOSITION. Arpad A. Vass et al. en *Microbiology Today*, vol. 28, págs. 190-192; noviembre de 2001.

ODOR ANALYSIS OF DECOMPOSING BURIED HUMAN REMAINS. Arpad A. Vass et al. en *Journal of Forensic Sciences*, vol. 53, n.º 2, págs. 384-391; marzo de 2008.



2. HUESOS SECOS. Los esqueletos humanos en su estado seco final pueden preservarse durante años y fosilizar si el suelo es árido y contiene determinados minerales.

CONOCER EL MOMENTO DE LA MUERTE

Los científicos forenses, entre los que se cuenta el autor, estudian los cuerpos en descomposición con la finalidad de mejorar los métodos para determinar con mayor precisión el momento de la muerte y para hallar tumbas clandestinas. Han identificado más de 400 compuestos que se liberan durante la descomposición, datos que contribuyen a ese doble objetivo. En el laboratorio del autor se ha creado asimismo un instrumento electrónico portátil (llamado Labrador) que detecta muchos de esos compuestos. De esas sustancias, hay unas 30 que, identificadas juntas, indican la presencia de restos humanos. Entre ellas, cabe mencionar:

FREONES. Moléculas parecidas al refrigerante de neveras y acondicionadores de aire. Si se ha consumido agua tratada con flúor o pasta de dientes que lo contenga, se acumulan (en forma inerte) en los tejidos y matrices óseas a lo largo de la vida.

HIDROCARBUROS AROMATICOS. La descomposición del cuerpo humano emana un olor especial, dulzón y empalagoso, causado sobre todo por compuestos aromáticos como el benceno, un componente importante de la gasolina.

COMPUESTOS DE AZUFRE. El disulfuro de dimetilo y el sulfuro de hidrógeno, que también se desprenden de la vegetación en descomposición en ciénagas y turberas, causan un olor a huevos podridos.

TETRACLORURO DE CARBONO. Originado por las bacterias en el proceso de descomposición, este compuesto de olor desagradable se usó durante un tiempo como disolvente para el lavado en seco y en la fabricación de clorofluorocarburos (que destruyeron parcialmente la capa de ozono). Ahora está prohibido para la mayoría de las aplicaciones debido a su elevada toxicidad y efectos cancerígenos.

1. LOS BARASANA habitan en la región noroccidental de la Amazonía colombiana. Sus complejas ideas sobre la íntima conexión que une al hombre con la naturaleza han dado lugar a una serie de prácticas ambientales que reducen al mínimo el impacto sobre el entorno. En 1991, el gobierno colombiano cedió a los pueblos indígenas de la Amazonía noroccidental derechos sobre la tierra en una región del tamaño del Reino Unido. Gracias a ello, los barasana han pasado de hallarse en peligro de extinción a experimentar un renovado florecimiento cultural. Se encuentran entre los escasos afortunados.

Los últimos indígenas

El patrimonio de la humanidad
se reduce cada vez que se extingue una cultura.
Conservarlo está en nuestras manos

<< TEXTO Y FOTOGRAFIAS DE WADE DAVIS >>

A lo largo de los últimos diez años, los genetistas han demostrado que todos los humanos descendemos de un número reducido de individuos que salieron de Africa hace unos 60.000 años. Tal herencia común implica que todas las culturas compartimos el mismo potencial y dotes creativas similares. Las diferentes formas en que los humanos hemos decidido invertir nuestro intelecto (ya sea para lograr las impresionantes innovaciones tecnológicas características de Occidente o para mantener redes de parentesco de enorme complejidad, como las existentes entre los aborígenes australianos) no son sino una cuestión de opción y orientación, de ventajas adaptativas y de prioridades culturales. Cada sociedad constituye una respuesta única a la pregunta sobre lo que significa ser humano. Y el conjunto de todas las culturas existentes compone el repertorio de conocimientos del que dispone la humanidad para afrontar los próximos milenios.

Sin embargo, son numerosas las voces que se apagan a un ritmo estremecedor. Un indicador clave de semejante pérdida cultural lo proporciona el número de lenguas que desaparecen. Un idioma representa mucho más que un sistema gramatical o un vocabulario: constituye el vehículo con el que se materializa la esencia de una cultura. Los lingüistas coinciden en que el 50 por ciento de los 7000 idiomas del planeta se hallan en peligro de extinción. Cada dos semanas fallece un anciano que se lleva consigo las últimas sílabas de una lengua. De continuar a semejante ritmo, dentro de una generación o dos podremos certificar la pérdida de la mitad de la herencia social, cultural e intelectual de la humanidad. Este es el ignorado telón de fondo de nuestra época.

A menudo surge la pregunta sobre la importancia real de la desaparición de culturas exóticas, de sus creencias y rituales. ¿Por qué a una familia occidental habría de importarle la extinción de una lejana tribu africana? De hecho, lo más probable es que le importe bastante poco. No más que lo que pueda interesar a una tribu africana la desaparición de una ciudad occidental. Desde aquí me gustaría argumentar a favor de la idea de que la pérdida de cualquier modo particular de vida afecta a la humanidad en conjunto.

Consideremos el caso de los polinesios. Diez siglos antes de Cristo, en una época en que los marineros europeos no contaban con ningún método para medir longitudes geográficas y no se atrevían a adentrarse en alta mar, los polinesios ya surcaban el Pacífico. Protagonizaron una diáspora que los llevó a poblar desde Hawai a Rapa Nui y desde las Marquesas a Nueva Zelanda. Carecían de cualquier sistema de escritura. Sólo podían saber en qué lugar se hallaban recordando cómo habían llegado hasta allí. En cada travesía, los navegantes debían memorizar los cambios de viento, las variaciones de la corriente y el aspecto del mar, el cielo y las nubes. Aún a día de hoy, los marineros polinesios, con quienes he tenido el placer de viajar, nombran con facilidad unas 250 estrellas del firmamento. Sólo con observar la resonancia de las olas en el casco de su embarcación, los pilotos infieren la presencia de atolones sitos más allá del horizonte. Saben que cada grupo de islas tiene su propio patrón de reflexión y que éste puede leerse con la misma facilidad con la que un forense identificaría una huella digital. En la oscuridad logran discernir entre cinco tipos de oleaje. Discriminan entre los causados por fenómenos meteorológicos y aquellos provocados por corrientes submarinas, las cuales siguen con la misma facilidad con la que un explorador terrestre llegaría hasta el mar guiado por el curso de un río.

Existe una gran cantidad de ejemplos similares. Para los barasana, pueblo originario de la zona noroccidental de la Amazonía colombiana, todos los elementos pertenecientes al mundo natural se hallan unidos de manera inextricable. Sobre tal concepto se asienta toda una mitología natural de gran complejidad que, a su vez, ha dado lugar a una serie de prácticas muy eficaces en la gestión del ecosistema y sus recursos. Por su parte, los budistas del Tíbet pasan gran parte de su vida preparándose para la muerte, algo en lo que la mayoría de nosotros evita pensar. Su manera de concebir la mente humana —basada en una tradición empírica y observacional de 2500 años de antigüedad— ha de contribuir de alguna forma al patrimonio intelectual de la humanidad.

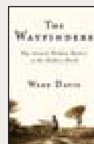
Nada de ello quiere decir que debamos fomentar la inmutabilidad de las culturas, como tampoco implica que éstas pierdan su identidad si deciden modificar sus tradiciones. De la misma manera en que los rancheros estadounidenses no perdieron su identidad cuando sustituyeron las calesas por automóviles, los haida no dejaron de ser una tribu amerindia cuando cambiaron sus canoas por lanchas motoras. No es el cambio o la tecnología lo que amenaza la cultura; es la dominación.

La mayor de las tragedias no es que desaparezcan sociedades arcaicas, sino que existan fuerzas, por lo demás evitables, que provoquen su extinción. Dichas fuerzas son de varias clases. Podemos citar el desarrollo industrial, como es el caso de las atroces prácticas de silvicultura que, en las selvas tropicales de Borneo, han acabado con las bases de subsistencia del pueblo nómada penan; o los vertidos petroquímicos que arruinaron por completo las tierras que el pueblo ogoni cultivaba en el delta del Níger. Las epidemias constituyen otro ejemplo de amenaza: los yanomami, del Amazonas, han sufrido enormes tasas de mortandad como consecuencia de los patógenos introducidos por los mineros que invadieron sus tierras en busca de oro. También existen amenazas ideológicas, como la dominación de los budistas tibetanos por la China comunista.

Vemos así que las culturas no se extinguen solas, sino que, a menudo, lo hacen como consecuencia de actividades e intereses ajenos. En realidad, se trata de una observación optimista: ya que los causantes del declive de las culturas somos los humanos, también está en nuestra mano fomentar la supervivencia cultural. Como ejemplo podemos citar el caso de los indios barasana: después de que el gobierno colombiano decidiera en 1991 cederles los derechos sobre las tierras del Amazonas noroccidental, su cultura ha prosperado de manera continuada. El objetivo no es congelar las culturas en el tiempo, sino asegurar un mundo plural en el que todos los pueblos puedan beneficiarse de la modernidad sin que deban, por ello, sacrificar su identidad étnica.

EL AUTOR





Wade Davis es antropólogo, etnobotánico, cineasta y fotógrafo. Este reportaje fotográfico se ha inspirado en su última obra, *The Wayfinders: Why Ancient Wisdom Matters in the Modern World* (Anasi, 2009).



2. HOKULE'A, LA CANOA SAGRADA de la Sociedad Viajera de Polinesia, en las costas de Hawai. De acuerdo con la forma de navegación tradicional, los exploradores polinesios surcan el océano sin ninguna ayuda instrumental. Emplean una variante del método conocido como "navegación a estima": para identificar su posición, trazan mentalmente la distancia y la dirección desde el último punto conocido.



3. UNA MUJER ARIAAL en el monte Marsabit, en el norte de Kenia, vuelve a casa con leña. Durante generaciones, los ariaal han sobrevivido a las sequías del desierto de Kaisut gracias a su estilo de vida nómada. La presión que las organizaciones internacionales de ayuda comenzaron a ejercer en el decenio de 1970 les forzaron a adoptar una vida sedentaria. Ello condujo al agotamiento de sus recursos y a una dependencia permanente de dichas organizaciones de ayuda.

4. UN ABORIGEN AUSTRALIANO de Arnhem Land caza para obtener comida. Para los aborígenes, el pasado, el presente y el futuro no existen. Su idioma tan siquiera cuenta con la palabra "tiempo". La meta de la humanidad no es transformar la naturaleza, sino conservar el mundo tal y como éste fue engendrado (*arriba*). Los penan habitan en las selvas tropicales de Borneo. Durante largo tiempo fueron una floreciente civilización nómada. La deforestación ha destruido su cultura y los ha obligado a asentarse (*abajo*).





5. UN NIÑO INUK en Nunavut, Canadá, observa una laguna formada por la fusión del hielo. Una consecuencia del calentamiento global que ha puesto en peligro al oso polar y a otros animales que los pueblos indígenas necesitan cazar para su supervivencia.

PARA SABER MAS

NOMADS OF THE DAWN: THE PENAN OF THE BORNEO RAIN FOREST. Wade Davis, Ian MacKenzie y Shane Kennedy. Pomegranate Press, 1995.

SEAFARING IN THE CONTEMPORARY PACIFIC ISLANDS: STUDIES IN CONTINUITY AND CHANGE. Dirigido por Richard Feinberg. Northern Illinois University Press, 1995.

THE SEARCH FOR SHANGRI-LA: A JOURNEY INTO TIBETAN HISTORY. Charles Allen. Abacus, 2000.

AS PASTORALISTS SETTLE: SOCIAL, HEALTH, AND ECONOMIC CONSEQUENCES OF THE PASTORAL SEDENTARIZATION IN MARSABIT DISTRICT, KENYA. Dirigido por Elliot Fratkin y Eric Abella Roth. Springer, 2005.

WHEN LANGUAGES DIE: THE EXTINCTION OF THE WORLD'S LANGUAGES AND THE EROSION OF HUMAN KNOWLEDGE. K. David Harrison. Oxford University Press, 2007.

SHADOWS IN THE SUN: TRAVELS TO LANDSCAPES OF SPIRIT AND DESIRE. Wade Davis. Island Press, 2010.

Biodiversidad en el fango

Esther Garcés y Silvia Anglès

El conocimiento de la composición de las especies de fitoplancton en las zonas costeras resulta fundamental para entender los episodios de proliferaciones algales. También es primordial disponer de información sobre la presencia de nuevas especies, algunas tal vez introducidas, para confirmar si los eventos de proliferaciones están causados por organismos nuevos.

En el caso de los dinoflagelados, el ciclo biológico se caracteriza por la alternancia entre la fase vegetativa planctónica y la fase de resistencia bentónica, o quiste de resistencia. Esta alternancia tiene profundas implicaciones en la dinámica de la población. La fase vegetativa planctónica es la responsable de las proliferaciones en el agua durante un período de tiempo corto. Una vez se ha producido la proliferación, las poblaciones se enquistan y sedimentan, con la consiguiente acumulación de los quistes de resistencia en el sedimento.

Los quistes de resistencia en los sedimentos superficiales constituyen un repertorio temporal integrado de la diversidad de las especies que alguna vez han ocupado la columna de agua. Cuantificar estos quistes y estudiar el papel de los fangos como "semilleros" proporciona información de referencia para describir los patrones geográficos de las especies, así como para detectar la introducción de organismos nuevos y evaluar la biodiversidad en un lugar determinado.

Nos gustaría recordar la definición que R. Margalef propuso para la biodiversidad, pues en ella incluía las etapas de reposo, los quistes de resistencia y el banco de semillas, todos ellos preparados para renacer si se dan las condiciones ambientales idóneas.





1. TESTIGO DE PERFORACION del sedimento marino.

LIFE INDEMARES/CSIC (*fondo*); SILVIA ANGLES, INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR, CSIC (*resto de ilustraciones*)











2. QUISTES DE RESISTENCIA de dinoflagelados de los géneros *Gyrodinium* (*a*), *Protoperidinium* (*b*), *Lingulodinium* (*c*), *Gonyaulax* (*d*) y *Scrippsiella* (*e*) hallados en sedimentos de la costa catalana. Escala: 10 micrómetros.

Una crisis aún más profunda

Sobre la pasividad frente a una sostenibilidad global

Jeffrey D. Sachs

Tras esta última columna, *Desarrollo Sostenible* se trasladará a la página web del Instituto de la Tierra (a partir de ahora, disponible en inglés en www.earth.columbia.edu). Desearía aprovechar esta ocasión para agradecer a todos mis lectores y para hacer inventario de lo que, a mi juicio, supone una crisis cada vez más profunda del desarrollo sostenible.

Durante todo el tiempo que llevo escribiendo esta sección, la incapacidad del mundo para afrontar la creciente crisis ambiental sólo se ha dejado sentir aún más. Todos los objetivos clave que las organizaciones internacionales se habían fijado para 2010 han sido pospuestos, ignorados o han fracasado. Por desgracia, parece posible que este año pase a la historia como el más caluroso de todos los registrados. Una muestra más de que las catástrofes ambientales provocadas por el hombre han escapado a nuestro control.

Este iba a ser el año de la biodiversidad. En 2002, bajo el auspicio de la Convención de las Naciones Unidas para la Diversidad Biológica, las naciones se comprometieron a que, para 2010, habrían ralentizado la pérdida de diversidad que padece el planeta. Semejante propósito no ha alcanzado siquiera sus objetivos más modestos. De hecho, para los estadounidenses pasó desapercibido: EE.UU. firmó el acuerdo en 1992, pero la ratificación nunca llegó. Cayó presa del error, característico de la mentalidad estadounidense, de pensar que la naturaleza debe subdividirse en parcelas de propiedad privada en las que cada propietario goza del derecho de hacer y deshacer a su antojo.

El 2010 también iba a ser el principio de un nuevo tratado post-Kioto. Pero éste nació muerto como consecuencia de la parálisis crónica de la política de los EE.UU. Barack Obama se presentó en la cumbre de Copenhague con las manos vacías. Y EE.UU., China y otras potencias se conformaron con una declaración de buenas intenciones no vinculante, en lugar de propugnar una estrategia operativa y un proceso de ejecución.

Según la campaña electoral de Obama, 2010 también iba a ser el primer año de una nueva política climática y energética para EE.UU., así como el segundo año de una "recuperación verde". Ninguna de las dos se ha materializado. La recuperación nunca llegó a arrancar: Obama apostó por "estimular" a unos consumidores exhaustos en vez de optar por un programa a largo plazo de inversión pública en infraestructura sostenible. El Senado, fiel a su estilo, mantuvo por decimoctavo año consecutivo su pasividad ante el calentamiento global desde que, en 1992, ratificase la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático.



El año comenzó marcado por la falsa controversia del *Climategate:* la filtración de ciertos correos electrónicos procedentes de climatólogos británicos en los que, debido al uso de un lenguaje irreflexivo y nada recomendable, la derecha quiso hacer ver la prueba de una vasta conspiración mundial. A pesar de que, desde entonces, las críticas independientes han rechazado cualquier cargo de conspiración científica, el daño ya está hecho: una vez más, la opinión pública estadounidense prefiere restar crédito a lo que la ciencia básica tiene que decir sobre el cambio climático inducido por el hombre.

No sólo estamos perdiendo tiempo. A medida que el mundo se aproxima o traspasa varios umbrales de riesgo ambiental, también estamos perdiendo el margen de maniobra que nos deja el planeta. Al tiempo que la población mundial continúa aumentando a un ritmo de, como mínimo, 75 millones de personas al año, y mientras gran parte del mundo en desarrollo experimenta un tórrido crecimiento, se intensifican los problemas derivados de la deforestación, la polución, las emisiones de gases de efecto invernadero, la extinción de especies y la acidificación de los océanos.

¿Qué pautas inherentes a nuestros procesos socioeconómicos provocan, una y otra vez, los mismos fracasos? Primero: la escala global de los riesgos para la sostenibilidad carece de precedentes, a lo que hay que añadir que dichos riesgos sólo se han hecho patentes, y de modo repentino, para las dos últimas generaciones. Segundo: los problemas son científicamente complejos e implican enormes incertidumbres. No sólo debe la opinión pública hacerse cargo de la situación actual, sino que también las ciencias clave deben abrirse paso para medir, evaluar y afrontar los nuevos retos. Tercero: aunque los problemas son mundiales, cualquier política es claramente local, lo que supone un obstáculo para las medidas internacionales coordinadas y a largo plazo. Cuarto: mientras que los problemas abarcan décadas, la visión de futuro de los políticos no va más allá de la siguiente convocatoria electoral, y la de buena parte de la población no pasa del siguiente almuerzo o de la próxima paga. Quinto: los intereses empresariales han dominado las oscuras artes de la propaganda y recurren a sus generosos bolsillos para comprar gran cantidad de información malintencionada con el fin de engañar al público.

Se trata de lograrlo o morir: debemos hacer llegar a la esfera pública una ciencia objetiva y otorgar poder a una ciudadanía democrática que, antes de que sea demasiado tarde, debe convertirse en administradora responsable del planeta.

Jeffrey D. Sachs es director del Instituto de la Tierra de la Universidad de Columbia.



[GENETICA]

Extinción por reducción del genoma

¿Con cuántos genes puede sobrevivir una célula? El estudio de ciertas bacterias simbiontes, que se hallan al borde de la extinción por pérdida de genes, arroja luz sobre esta cuestión

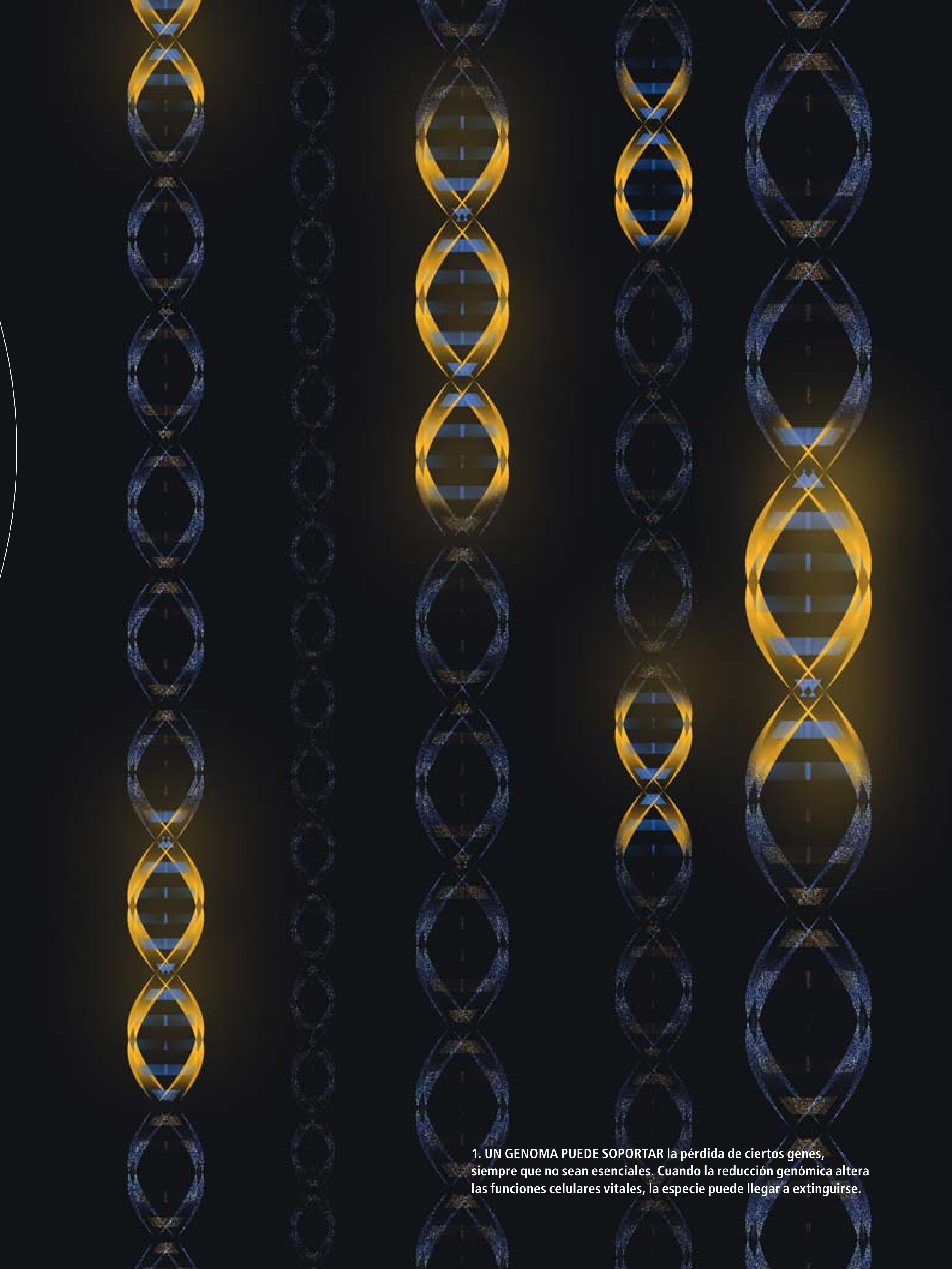
VICENTE PEREZ BROCAL, AMPARO LATORRE Y ANDRES MOYA

CONCEPTOS BASICOS

- Las bacterias que viven en simbiosis con insectos son un modelo idóneo para estudiar la reducción de los genomas en la naturaleza.
- La reducción del genoma lleva a la conversión de las bacterias en orgánulos, a su extinción y sustitución por otra bacteria o a su perpetuación a lado de otras bacterias.
- Al concepto de genoma mínimo se ha llegado por dos grandes vías, la vía computacional y la vía experimental, que tienden a integrarse.

Dentro de la enorme diversidad de formas de vida que pueblan la Tierra, uno de los grupos que sin duda mayor éxito y prosperidad han logrado es el de las bacterias. Un rasgo que las caracteriza es su amplio espectro de capacidades metabólicas. Ello les ha permitido colonizar prácticamente todo el planeta: desde varios kilómetros en el interior de la litosfera hasta la troposfera, y en todo tipo de ecosistemas terrestres y acuáticos, de los más favorables a los más extremos. No es de extrañar, pues, que numerosas bacterias hayan desarrollado asociaciones físicas con otros organismos con capacidades metabólicas más limitadas, entre los que se incluyen otras bacterias, protozoos, hongos, plantas o animales.

Cuando son estrechas y duraderas, esas asociaciones entre especies distintas se denominan simbiosis. Consisten en relaciones beneficiosas para ambos miembros de la asociación (mutualismo) y relaciones en las que el beneficio de uno resulta perjudicial



1. UN GENOMA PUEDE SOPORTAR la pérdida de ciertos genes, siempre que no sean esenciales. Cuando la reducción genómica altera las funciones celulares vitales, la especie puede llegar a extinguirse.



2. HEMBRA ADULTA DE PULGON DEL CEDRO, *Cinara cedri*. Este insecto alberga en un órgano especializado, el bacterioma, hasta tres tipos de bacterias con las que establece relaciones de simbiosis.

para el otro (parasitismo). Hallamos casos de mutualismo en las asociaciones establecidas entre ciertos hongos y algas o cianobacterias —que dan lugar a los líquenes—, entre plantas leguminosas y bacterias del género *Rhizobium*, y entre peces y otros animales marinos y bacterias quimioluminiscentes. El parasitismo lo conocemos de primera mano, pues se desarrolla entre bacterias patógenas y animales —entre ellos los humanos—, a los que causan un sinfín de enfermedades infecciosas (peste, cólera, tifus, septicemias, etcétera). El espectro entre mutualismo y parasitismo es continuo y a veces resulta difícil distinguir uno de otro; una misma asociación puede tener consecuencias positivas o negativas según las circunstancias ambientales.

Aunque habituales en muchos invertebrados, las simbiosis bacterianas con animales han recibido escasa atención hasta hace apenas dos décadas. Los mayores progresos se llevaron a cabo inicialmente con simbiontes patógenos, debido a su interés sanitario. En los últimos años, el estudio de las simbiosis bacterianas mutualistas ha recibido una atención creciente.

BACTERIAS SIMBIONTES DE INSECTOS

De las simbiosis en las que participan bacterias, una de las más estudiadas es la que establecen con un grupo animal altamente exitoso y diversificado: los insectos. Las asociaciones entre insectos y bacterias intracelulares son corrientes en la naturaleza. Se estima que entre un 15 y un 20 por ciento de las especies de insectos albergan endosimbiontes. En general, parece que estas simbiosis han evolucionado en torno a interacciones de carácter nutricional.

Un rasgo frecuente en las simbiosis mutualistas es una dieta del insecto especializada y limitada en nutrientes. Pensemos en los pulgones, los psílidos, las moscas blancas o las cochinillas, que se alimentan del floema, muy rico en azúcares pero deficiente en aminoácidos. O en las chicharras, que lo hacen del xilema, de bajo contenido en azúcares y aminoácidos. Cabe mencionar también la madera muerta de la que se alimentan las termitas, compuesta mayoritariamente por celulosa y lignina y pobre en proteínas y aminoácidos; el grano almacenado por los gorgojos, con un escaso contenido en vitaminas y aminoácidos; o la sangre de la que se alimenta la mosca tse-tsé, deficiente en vitaminas del complejo B.

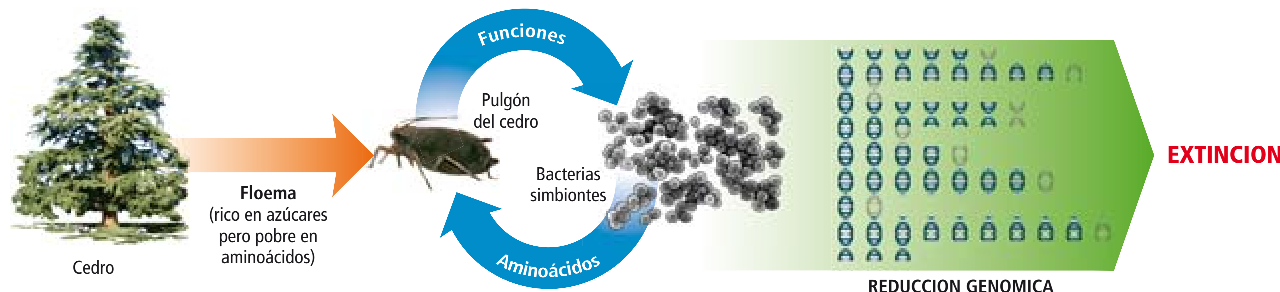
Esos insectos con dietas pobres presentan asociaciones con bacterias simbióticas obligadas, por lo que la base de la relación parece ser nutricional. Sin embargo, la presencia de simbiontes bacterianos obligados en insectos con dietas más variadas, como hormigas y cucarachas, sugiere que la función de las bacterias puede abarcar otros aspectos, como el reciclaje y la asimilación de compuestos nitrogenados.

En ciertos casos, junto con esas bacterias mutualistas, presentes de una manera casi universal, pueden hallarse otras bacterias. Su presencia y distribución varía mucho entre sus

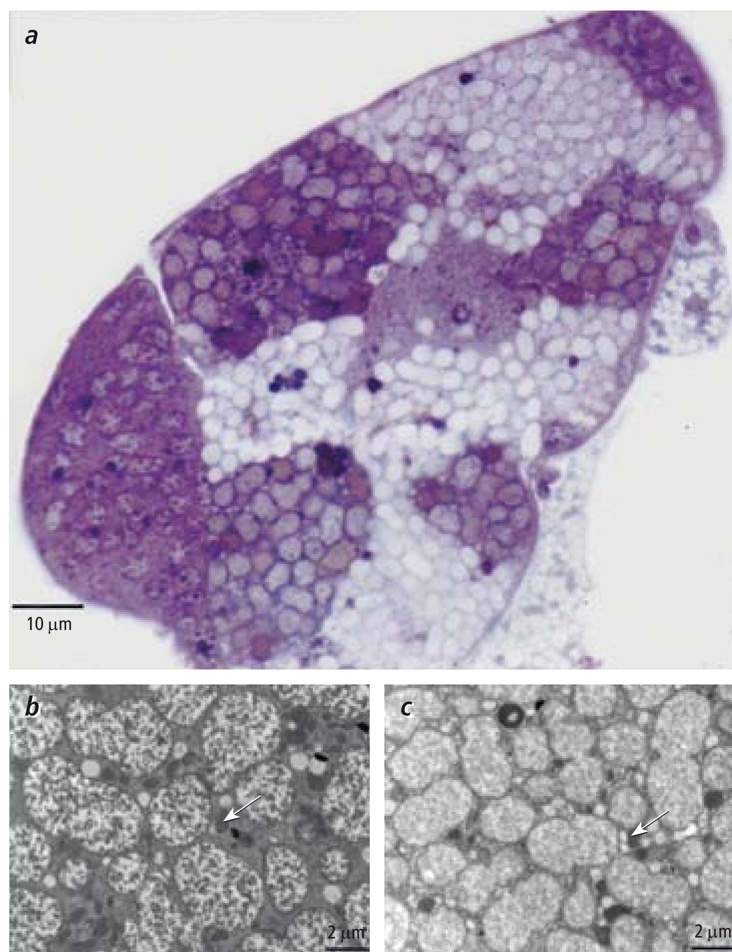
PERDIDA DE GENES: ¿EL CAMINO HACIA LA EXTINCION?

El pulgón del cedro (*Cinara cedri*) establece una asociación mutualista con ciertas bacterias que le aseguran una nutrición equilibrada (el floema, el alimento que extrae del cedro, es rico en azúcares pero pobre en aminoácidos, *naranja*). Como en toda simbiosis mutualista, todos ganan (*azul*): el pulgón obtiene los aminoácidos que le faltan y las bacterias se benefician de las funciones que realiza el huésped.

Sin embargo, el nuevo escenario puede acabar causando la extinción de la especie bacteriana. Por un lado, los endosimbiontes experimentan una reducción genómica (*verde*): van perdiendo las funciones que, al obtenerlas del hospedador, se tornan redundantes; conservan sólo las funciones esenciales (homeostasis, reproducción y transmisión) y las que resultan necesarias para el funcionamiento de la red mutualista. Por otro, al medrar en un ambiente aislado y rico en nutrientes, la selección natural opera con escasa fuerza en esas poblaciones: los individuos con mutaciones perjudiciales no son necesariamente retirados de la circulación. Si esta degradación genómica prosigue hasta causar la alteración de las funciones celulares vitales, la especie puede llegar a extinguirse (*rojo*).



CORTESIA DE LOS AUTORES



3. ANALISIS MICROSCOPICO de los bacteriocitos del pulgón del cedro (*Cinara cedri*). Sección semifina del pulgón (*a*), de 1,5 micrometros, que muestra los dos tipos de bacteriocitos presentes en esta especie: los primarios, que contienen *Buchnera aphidicola* (*oscuro*), y los secundarios, que albergan al simbionte secundario, "*Candidatus* Serratia symbiotica" (CSs) (*claro*). Micrografías electrónicas del mismo individuo (*b* y *c*) que muestran la forma redondeada de *B. aphidicola* y del simbionte secundario CSs (*flechas*) dentro de sus respectivos bacteriocitos.

CORTESIA DE LOS AUTORES

hospedadores, y sus efectos son menos conocidos y en general accesorios para el insecto. Esas bacterias oportunistas se han denominado simbiontes secundarios para diferenciarlos de los primarios. Unos y otros difieren además en su modo de transmisión: los simbiontes primarios se transmiten casi exclusivamente por vía materna; los secundarios, en cambio, suelen hacerlo a través de infecciones entre individuos, incluso de especies distintas.

ADAPTACION AL MEDIO INTERNO

Como consecuencia de su adaptación al interior de células especializadas del insecto (bacteriocitos), los simbiontes primarios han experimentado una serie de cambios más o menos drásticos con respecto a sus ancestros de vida libre, cambios que se hacen patentes a escala genómica.

Gracias a la estabilidad ambiental del medio intracelular en que se desarrollan las bacterias, protegido de los factores ambientales externos y rico en nutrientes, los endosimbiontes tienden a acomodarse a estas condiciones favorables; han perdido así las funciones que se han vuelto innecesarias o redundantes porque ya se las proporciona el hospedador.

Por todo ello, esas bacterias comparten una serie de rasgos comunes. Todas han conservado funciones esenciales en su homeostasis, reproducción y transmisión a nuevos hospedadores. Realizan asimismo actividades que el hospedador no lleva a cabo y resultan necesarias para el funcionamiento del sistema (para la bacteria, para el insecto o para ambos).

En el caso más estudiado de los pulgones, su endosimbionte primario (*Buchnera aphidicola*) conserva, con alguna excepción, los genes responsables de la síntesis de aminoácidos esenciales ausentes en la dieta del pulgón, basada en savia elaborada. El endosimbionte primario (*Wigglesworthia glossinidia*) de la mosca tse-tsé mantiene genes implicados en la biosíntesis de cofactores, grupos prostéticos y transportadores, lo que complementa la deficiente dieta de su hospedador, basada en sangre de vertebrados. El endosimbionte primario de las chicharras, que se alimentan del xilema (formado sobre todo por compuestos inorgánicos), aporta también vitaminas y cofactores a su hospedador. En los insectos como las hormigas carpintero, con una dieta más equilibrada, la función de su endosimbionte primario ("*Candidatus* Blochmannia sp.") se relaciona con el reciclaje de compuestos nitrogenados y aporte de nutrientes en períodos clave del desarrollo del insecto en que éste no se alimenta, como la metamorfosis o la fundación de colonias. En cada caso, el repertorio de genes conservados en relación con los nutrientes que el simbionte suministra al insecto varía en función de las necesidades de éste.

NOMENCLATURA BASICA

En *Buchnera aphidicola*, la simbiosis se abrevia con tres siglas: la primera de ellas hace referencia al género del simbionte; las dos siguientes, al género y especie del huésped.

BCc: *Buchnera aphidicola* asociado al pulgón *Cinara cedri*.

El término *Candidatus* indica un estatus provisional para bacterias que no cumplen todavía con todas las características descriptivas que exige el Código Internacional de Nomenclatura de Bacterias. *Candidatus* se escribe en cursiva, mientras que el resto del nombre (género y especie) no. Todo ello, entre comillas.

REDUCCION DEL GENOMA

Desde la secuenciación del primer genoma de una bacteria, *Haemophilus influenzae,* por el equipo de Robert D. Fleischman en 1995, el número de genomas totalmente secuenciados no ha cesado de aumentar. El tamaño de los genomas bacterianos secuenciados hasta la fecha varía entre las 13.033 kilobases (kb) de la bacteria del suelo *Sorangium cellulosum*, y los más pequeños, que corresponden a endosimbiontes de insectos, como "*Candidatus* Hodgkinia cicadicola" (143 kb), "*Candidatus* Zinderia insecticola" (208 kb) o "*Candidatus* Sulcia muelleri" (243 kb).

La secuenciación de un número creciente de genomas bacterianos ha puesto de manifiesto el fenómeno de reducción del tamaño del genoma. En organismos de vida libre, este tipo de evolución es infrecuente; en cambio, abundan

los casos referidos a parásitos y mutualistas intracelulares obligados.

Entre estos últimos, cabe mencionar la secuenciación realizada por nuestro equipo del genoma de *Buchnera aphidicola* asociado al pulgón *Cinara cedri* (Bcc). Se trata del octavo endosimbionte primario de insectos secuenciado por completo. Los anteriores corresponden a *B. aphidicola*, endosimbionte de otras tres especies de pulgones (*Acyrtosiphon pisum*, *Schizaphis graminum* y *Baizongia pistaciae*), dos especies del endosimbionte de las hormigas carpintero ("*Candidatus* Blochmannia floridanus" y "*Candidatus* B. pennsylvanicus"), el de la mosca tse-tsé (*Wigglesworthia glossinidia*) y el de la chicharra ("*Candidatus* Baumannia cicadellicola"). Otros proyectos de secuenciación están en camino.

Al hallarse confinadas en hábitats aislados y ricos en nutrientes, las bacterias endosimbiontes apenas sufren la presión de la selección natural

¿Cómo se ve afectado el genoma de esas bacterias por la pérdida selectiva de genes? ¿Por qué unos genes se han retenido en mayor proporción que otros?

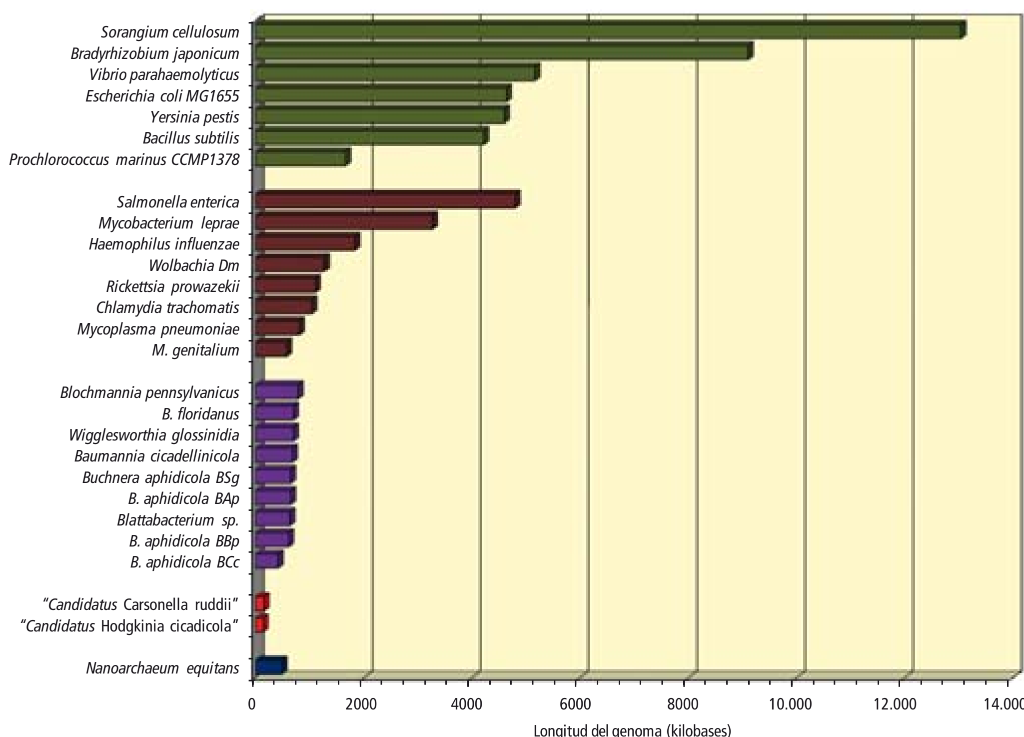
En primer lugar, el hábitat de esas bacterias y su modo de transmisión han resultado determinantes en su evolución. Por tratarse de bacterias confinadas en un hábitat muy restringido y aislado del exterior, presentan poblaciones de tamaño reducido y con escasas posibilidades de intercambio de material genético con otras poblaciones o especies. Asimismo, medran en un ambiente rico en nutrientes y protegido. Todo ello ha provocado un debilitamiento de la selección natural en esas poblaciones; esto es, las mutaciones perjudiciales que en otras circunstancias provocarían la eliminación de los individuos portadores de las mismas no son retiradas de la circulación. El genoma de las bacterias se va degradando de forma progresiva, con la consiguiente pérdida de función de genes.

Si la ausencia de esos genes no entraña graves consecuencias para la supervivencia del sistema, éste se desprenderá de ellos en breve tiempo. El resultado es la pérdida paulatina de genes. Puesto que los genomas bacterianos se caracterizan por su elevado grado de compactación (casi todo el genoma lo constituyen secuencias codificantes, con una escasa proporción de regiones intergénicas), la pérdida de genes se traduce de inmediato en una reducción proporcional en el tamaño del genoma. Por tanto, los genomas de menor longitud reflejan una mayor pérdida de genes a lo largo de la evolución.

EL FIN DE LA SIMBIOSIS

B. aphidicola BCc representa un claro ejemplo de minimización genómica en bacterias, con un genoma de 422 kb y tan sólo 362 genes codificantes de proteínas. Presenta, además, otra característica de sumo interés: todas las poblaciones de pulgones del cedro que hemos analizado contienen en abundancia una segunda bacteria endosimbionte, "*Candidatus* Serratia symbiotica", considerada simbionte facultativo en otras especies de pulgones. Su morfología no guarda semejanza con la de otras cepas de su especie, sino más bien con la de *B. aphidicola*. Estudios preliminares sobre el genoma de *S. symbiotica* sugieren que éste sintetiza dos nutrientes esenciales que *B. aphidicola* BCc no aporta a su hospedador: triptófano y riboflavina.

Según los datos microscópicos, funcionales y evolutivos, *B. aphidicola* BCc habría perdido parte de sus funciones mutualistas como consecuencia de su extrema degradación genómica. La simbiosis observada implicaría, pues, a tres actores: el pulgón, *B. aphidicola* y *S. symbiotica*. Si este proceso de degradación genómica continúa —algo que nuestros datos apuntan—, el destino de esta cepa de *B. aphidicola* terminaría en la pérdida



4. COMPARACION DEL TAMAÑO GENOMICO de diferentes bacterias, de acuerdo con su modo de vida: bacterias de vida libre o patógenos no obligados (*verde*), patógenos obligados (*marrón*), endomutualistas obligados (*violeta*), así como los casos de *C. ruddii* y *H. cicadicola* (*rojo*). Se muestra además el tamaño del genoma de la arquea *N. equitans* (*azul*), que no es una bacteria propiamente dicha.

CORTESIA DE LOS AUTORES

LOS AUTORES





Vicente Pérez Brocal es investigador postdoctoral de la Unidad Mixta de Investigación en Genómica y Salud del Centro Superior de Investigación en Salud Pública (CSISP) y la Universidad de Valencia. Su trabajo se ha centrado en la secuenciación y análisis genómicos de bacterias, así como en la evolución de orgánulos celulares en protozoos anaerobios y el estudio metagenómico del virioma humano.

Amparo Latorre es catedrática de genética de la Universidad de Valencia. Directora del Instituto Cavanilles de Biodiversidad y Biología Evolutiva, pertenece a la Unidad Mixta de Investigación en Genómica y Salud. Su labor investigadora se desarrolla en torno a la evolución de los simbiontes bacterianos de insectos, así como la metagenómica del intestino humano.

Andrés Moya es catedrático de genética de la Universidad de Valencia y jefe de área de la Unidad Mixta de Investigación en Genómica y Salud. Ha centrado su trabajo en estudios teóricos y experimentales en genética de poblaciones y evolución de virus de ARN, así como en la evolución de genomas en interacción, evolución de los simbiontes bacterianos de insectos y metagenómica humana.

de funciones vitales y, en consecuencia, en su extinción, en cuyo caso se vería reemplazada por el considerado hasta ahora simbionte secundario. También podría suceder que se alcanzara un estado de equilibrio en el sistema, si todos los miembros del consorcio llegaran a resultar imprescindibles para los demás.

Mención aparte merecen los casos de "*Candidatus* Carsonella rudii", el endosimbionte primario del psílido *Pachypsylla venusta*, secuenciado en 2006, o de "*Candidatus* Hodgkinia cicadicola", endosimbionte primario de la cigarra *Diceroprocta semicincta*, secuenciado en 2009. Con sólo 160 y 144 kb de longitud, y 213 y 189 posibles genes, respectivamente, estos genomas se consideran los de menor tamaño descritos en una célula viva. No obstante, no parece que reúnan los requisitos necesarios para definirse como organismos vivos. Debido a la extremada aceleración evolutiva, para casi una cincuentena de genes de *C. rudii* no se han identificado genes ortólogos (genes homólogos presentes en diferentes especies, derivados de un mismo gen ancestral). Además, una gran parte de los genes descritos se consideran dudosos, pues el grado de degeneración de su secuencia y su acortamiento son tales que parecen haberse perdido regiones esenciales para el correcto funcionamiento de la proteína codificada. Por otro lado, no se han determinado muchos de los componentes de la maquinaria universal de replicación, transcripción y traducción.

Quizás en estos casos no se pueda hablar ya de vida celular, sino de una transformación hacia un nuevo tipo de orgánulo, de modo parecido a lo sucedido con las ancestrales α-proteobacterias y cianobacterias que dieron origen a las actuales mitocondrias y cloroplastos, respectivamente.

CORTESIA DE LOS AUTORES

GENOMAS MINIMOS

El conocimiento de la existencia de genomas bacterianos tan reducidos suscita un interés doble. Por un lado, plantea la cuestión de cuál sería el genoma mínimo que se requiere para la vida. Por otro, abre vías a la construcción de una célula mínima, que a su vez ofrecería aplicaciones biotecnológicas. Podrían diseñarse "células a la carta", que trabajarían bajo nuestro entero control en la producción de compuestos de interés para la industria química, farmacéutica o alimentaria.

En primer lugar, deberían definirse las propiedades fundamentales asociadas al concepto de vida y de genoma mínimo. Hoy en día, se admite que la vida constituye una propiedad emergente de un sistema que muestra, de forma simultánea, tres rasgos: homeostasis, autorreproducción y evolución. De acuerdo con el grupo de Pier Luigi Luisi, del Departamento de biología de la Universidad de Roma Tres, toda célula requiere una forma de metabolismo para el mantenimiento de sus estructuras (homeostasis), un material hereditario con capacidad de replicarse y contener toda la información necesaria para componer una nueva célula (autorreproducción) y un mecanismo para generar variación que le permita adaptarse a las condiciones del entorno (evolución).

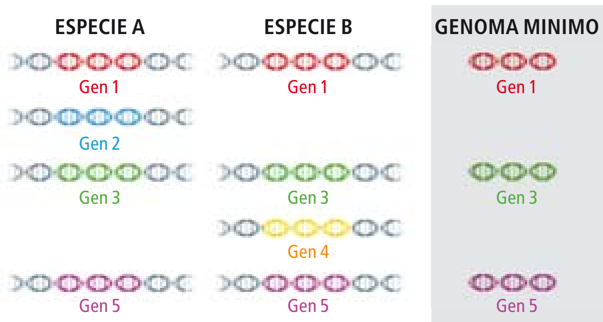
Según Eugene V. Koonin, del Centro Nacional para la Información en Biotecnología, de los Institutos Nacionales de Salud, en Bethesda, para la determinación del repertorio mínimo de

¿COMO SE DETERMINA UN GENOMA MINIMO?

Los trabajos que se proponen reconstruir el genoma bacteriano mínimo se basan en dos técnicas complementarias: la genómica comparada computacional y la mutagénesis dirigida o disrupción sistemática.

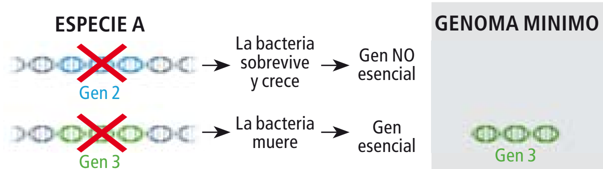
GENOMICA COMPARADA COMPUTACIONAL

Se comparan secuencias de ADN con el propósito de identificar genes ortólogos (genes homólogos presentes en diferentes especies, derivados de un mismo gen ancestral). Si un gen determinado es compartido por dos o más especies, se deduce que es "más esencial" que otro que falte en alguna de ellas y, por tanto, podría formar parte del genoma mínimo.



MUTAGENESIS DIRIGIDA O DISRUPCION SISTEMATICA

Se inactiva un gen determinado. Si la bacteria no sobrevive, el gen se considera esencial; de lo contrario, se considera prescindible y ausente en el genoma mínimo.



¿CUANTOS GENES NECESITA UNA CELULA PARA VIVIR?

Se han llevado a cabo varios intentos por perfilar una definición y reconstrucción del genoma bacteriano mínimo. La tabla muestra el número de genes que constituirían este genoma hipotético, de acuerdo con diferentes aproximaciones: computacionales (*azul*), experimentales (*rojo*) o combinadas (*verde*).

Año	Genoma comparado	Nº de genes
1996	*M. genitalium y H. influenzae*	256
2000	21 genomas de bacterias, arqueas y eucariotas	150
2003	3 cepas de *B. aphidicola, W. glossinidia y B. floridanus,*	277
	3 cepas de *B. aphidicola y M. genitalium*	180
2004	3 cepas de *B. aphidicola, R. prowazekii y C. trachomatis*	156
2006	*E. coli,* 3 cepas de *B. aphidicola y W. glossinidia*	245 ± 48
1995	*Bacillus subtilis*	300
1999	*M. genitalium y M. pneumoniae*	265-360
2001	*S. aureus*	>150
2002	*H. influenzae*	~670
2002	*S. aureus*	
2003	*E. coli*	620
2003	*B. subtilis*	271
2004	*E. coli*	433-620
2004	*B. subtilis, M. genitalium, E. coli y W. glossinidia, B. aphidicola* BAp, BSg, BBp, *B. floridanus*	206
2006	*B. subtilis, M. genitalium, E. coli y W. glossinidia, B. aphidicola* BAp, BSg, BBp, *B. floridanus*	208

genes de una célula viva, debería identificarse el menor grupo posible de genes necesarios para mantener una forma de vida celular en funcionamiento bajo las condiciones más favorables imaginables, esto es, en presencia de un complemento de nutrientes esenciales y la ausencia de estrés ambiental.

Los intentos recientes por perfilar una definición y reconstrucción del genoma bacteriano mínimo han seguido dos estrategias complementarias, los métodos computacionales y las aproximaciones experimentales, así como una integración de ambas.

Los análisis mediante genómica comparada computacional se fundan en el alineamiento de secuencias de ADN para la identificación de genes ortólogos. A pesar de que el genoma mínimo obtenido dependerá de cuántos y cuáles sean los taxones comparados, estos estudios son de gran utilidad para entender qué funciones resultan esenciales para definir una célula viva.

Su principal limitación estriba en que pueden subestimar el número de genes candidatos a ser incluidos en el genoma mínimo. Por una parte, la identificación de genes ortólogos entre genomas lejanamente emparentados no siempre resulta sencilla. Por otra, genes no ortólogos pueden desempeñar funciones similares en diferentes organismos. Ello implica que, incluso bajo las mismas condiciones ambientales y de vida, se pueden prever numerosas versiones de genomas mínimos.

Las estrategias experimentales se basan en datos indirectos obtenidos a partir de mutagénesis al azar o disrupción sistemática de genes. Se han seguido tres grandes tipos de análisis: mutagénesis masiva mediante transposones (elementos genéticos móviles que pueden moverse de una localización genómica a otra), uso de ARN antisentido para inhibir la expresión génica y desactivación individual de todos los genes de un genoma. Todas estas aproximaciones han dado lugar a conjuntos de genes compatibles con los resultados de la genómica comparada. Dichas estrategias presentan también limitaciones. En ocasiones arrojan falsos positivos (se consideran "esenciales" genes que en realidad no lo son); en otras, falsos negativos (se descartan genes vitales).

Tanto las estrategias computacionales como las experimentales sobre genomas mínimos indican un enriquecimiento relativo de los genes responsables de la transcripción frente a los genes implicados en procesos metabólicos. Ello se debe a la imposibilidad de encontrar sistemas alternativos en el primer caso frente a una mayor flexibilidad en el segundo. Pero, sea como fuere, dado que un genoma mínimo debe mantener su homeostasis metabólica, tendrá que incluir los genes necesarios para conservar una funcionalidad metabólica mínima y coherente.

Para aproximarnos más al genoma bacteriano mínimo, en nuestro laboratorio utilizamos las estrategias descritas arriba con el fin de identificar las vías metabólicas esenciales en la homeostasis celular. Obtuvimos un repertorio de 208 genes codificantes, dos tercios del cual correspondían a genes implicados en el procesamiento y almacenamiento de información genética, incluida una maquinaria casi completa de replicación del ADN, un sistema rudimentario de reparación del ADN, sistemas de transcripción y traducción (aunque sin reguladores), y mecanismos de procesamiento, plegamiento, secreción y degradación de proteínas. El resto de genes codificaban proteínas que intervienen en el transporte y uso de nutrientes del entorno, así como en la obtención de energía, y moléculas básicas para el mantenimiento de las estructuras celulares.

Los genes implicados en el transporte de nutrientes y funciones metabólicas varían ligeramente según la propuesta de genoma mínimo que se formule. Cuando varias rutas alternativas son posibles, la evolución hacia el genoma mínimo puede dar lugar a la retención de unas rutas u otras dependiendo en buena medida de fenómenos aleatorios. En este sentido, diferentes aproximaciones deberían concluir en varias soluciones, no en una sola.

No podemos hablar, por tanto, de una única forma de célula bacteriana mínima, al menos desde un punto de vista metabólico. No sólo las funciones esenciales pueden definirse en función del entorno donde se desarrolla la célula, sino que incluso bajo las mismas condiciones, diferentes conjuntos de genes podrían desempeñar esas mismas funciones.

PARA SABER MAS

A SMALL MICROBIAL GENOME: THE END OF A LONG SYMBIOTIC RELATIONSHIP? V. Pérez-Brocal, R. Gil, S. Ramos, A. Lamelas, M. Postigo, J. M. Michelena, F. J. Silva, A. Moya y A. Latorre en *Science*, vol. 314, págs. 312-313; 2006.

MINIMAL GENOMES REQUIRED FOR LIFE. R. Gil, V. Pérez Brocal, A. Latorre y A. Moya en *Prokaryote Diversity: Mechanisms and Significances*, dirigido por N. A. Logan, H. M. Lappin-Scott y P. C. F. Oyston. Cambridge University Press; Cambridge, 2006.

GENOMICS OF INTRACELLULAR SYMBIONTS IN INSECTS. M. J. Gosalbes, A. Latorre, A. Lamelas y A. Moya en *International Journal of Medical Microbiology*, vol. 300 n.º 5; págs. 271-278; 2010.

2010



[MEDIOAMBIENTE]

Agotamiento de los recursos naturales

Un informe gráfico sobre cuánto más le podemos pedir a nuestro planeta

<< MICHAEL MOYER >>

CON INFORMACION PROPORCIONADA POR CARINA STORRS

Si bien el siglo xx supuso un período de expansión aparentemente sin límites, los primeros años del siglo xxi nos han mostrado los confines de nuestro pequeño mundo. Hemos experimentado apagones regionales provocados por las limitaciones de nuestras fuentes energéticas; hemos visto cómo el agua comienza a escasear y que, para continuar extrayendo petróleo, nos vemos obligados a explotar yacimientos cada vez más recónditos. Una atmósfera que creíamos ilimitada se ahoga tras dos siglos de emisiones de carbono. Incluso la biodiversidad del planeta parece experimentar serios problemas.

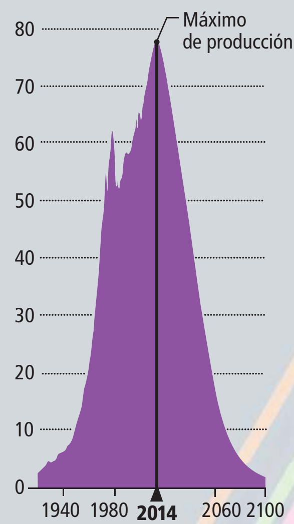
Las restricciones sobre los recursos y el entorno, combinadas con un gran crecimiento de la clase media en países como China o India, marcarán la manera en que habremos de vivir lo que queda de siglo y lo que haya de venir después. A continuación presentamos un informe gráfico sobre lo que el planeta aún puede darnos.

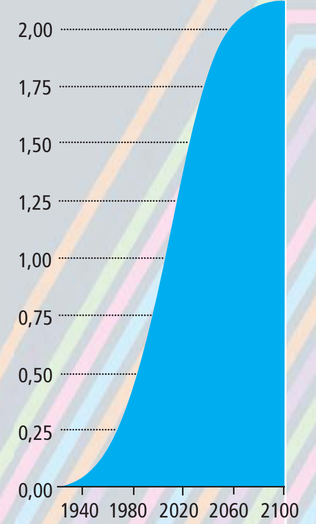
➥ Versión multimedia del artículo original en: **http://www.scientificamerican.com/interactive**

[PETROLEO]

2014 >> EL CENIT DEL PETROLEO

La respuesta más común a "cuánto petróleo queda" suele ser "depende de cuánto se desee explorar". A medida que se agotan los yacimientos de fácil explotación, técnicas cada vez más novedosas permiten extraer petróleo desde lugares cada vez más recónditos. Aunque los modelos estadísticos al uso no suelen tener en cuenta dichos avances, las últimas predicciones de producción petrolífera sí incluyen de manera explícita los futuros ciclos de mejoras técnicas. A pesar de algunas controversias relativas a dichos modelos, los mismos predicen que la producción de petróleo alcanzará un cénit en torno a 2014 y que en torno a 2050 habremos extraído el 90 por ciento de las reservas petrolíferas de la Tierra.





[AGUA]

1976-2005 >> FUSION DE LOS GLACIARES

A lo largo de los últimos decenios los glaciares han ido derritiéndose a un ritmo cada vez mayor. En algunas regiones, como Europa y América, los glaciares pierden ahora más de medio metro anual.



JEN CHRISTIANSEN

[MINERALES]

2028 >> INDIO

El óxido de indio y estaño es un conductor de capa fina empleado en los televisores de pantalla plana. Al ritmo de extracción actual, las reservas de indio conocidas en el planeta se agotarán hacia 2028.

[AGUA]

2025 >> LUCHA POR EL AGUA

Son numerosas las regiones del planeta en las que un único río principal abastece a varios países. El cambio climático, la contaminación y el crecimiento demográfico provocan una disminución paulatina de los recursos hídricos. En ciertas áreas, las reservas renovables de agua corren el peligro de caer por debajo de los 500 metros cúbicos por persona y año, el mínimo que necesita una sociedad para funcionar con normalidad.

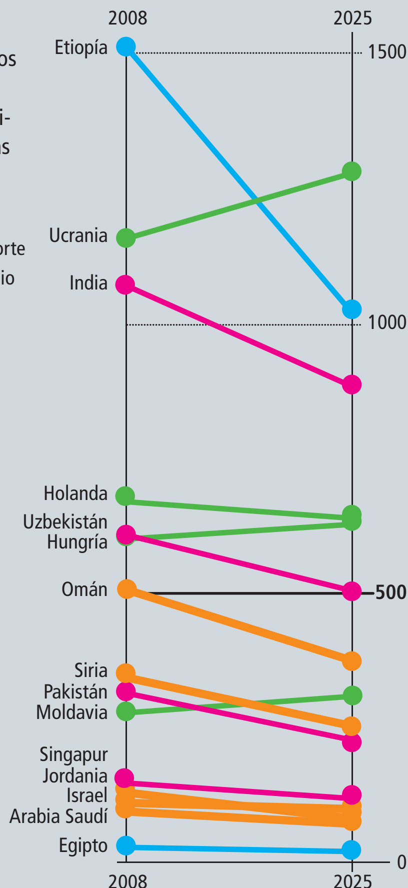
POTENCIALES ZONAS CONFLICTIVAS

EGIPTO: Un conjunto de países, con Etiopía a la cabeza, cuestiona antiguos acuerdos que ceden a Egipto más del 50 por ciento del caudal del Nilo. Sin el río, todo Egipto sería un desierto.

EUROPA ORIENTAL: La contaminación que durante decenios ha sufrido el Danubio ha provocado problemas en algunos países de su cuenca, como Hungría y Moldavia.

ORIENTE MEDIO: El 95 por ciento del caudal del río Jordán ha sucumbido a la sequía y los trasvases hacia Israel, Siria y Jordania.

ANTIGUA UNION SOVIETICA: El mar de Aral, en tiempos el cuarto mayor lago del mundo, ha perdido el 75 por ciento de sus reservas como consecuencia de los programas agrícolas iniciados en el decenio de 1960.



[MINERALES]

2039 >> PLATA

Debido a sus propiedades antibióticas natural, la plata se emplea en vendajes y como recubrimiento de artículos de consumo con una frecuencia cada vez mayor. A los niveles de extracción actuales, los yacimientos conocidos se agotarán en unos 19 años. No obstante, el reciclaje podría prolongar su empleo durante décadas.

[ALIMENTOS]

>> MENOS PECES

Los peces constituyen nuestro último alimento de origen silvestre. Sin embargo, el aumento en la demanda de pescado ha puesto a algunas especies al borde de la extinción.



TIBURON MARTILLO
Su población se ha visto mermada en un 89 por ciento desde 1986. Es preciado por sus aletas, cuya sopa se considera un manjar.

[BIODIVERSIDAD]

>> EXTINCION EN MASA

Los biólogos advierten que nos hallamos ante un proceso de extinción del estilo de los otros cinco que la Tierra ya ha vivido a lo largo de su historia, como la extinción masiva del Pérmico-Triásico (la "Gran Mortandad", que acabó con el 96 por ciento de la vida sobre la Tierra) o la del Cretácico-Terciario, que supuso el fin de los dinosaurios. En el caso actual, la causa del problema somos los humanos. Nuestro dominio sobre el planeta ha expulsado de sus hábitats naturales a gran número de especies; otras han sucumbido a la caza o la contaminación. Aquí presentamos una comparación entre las últimas estimaciones sobre la pérdida actual de especies y las correspondientes a extinciones pasadas.

Extinción del Pérmico-Triásico

Duración: Entre 0,72 y 1,2 millones de años
Pérdida de especies: 80 % – 96 %

Tasa de pérdida de especies (*ángulo de la flecha*):
8,0 % – 9,6 % por milenio

Extinción del Cretácico-Terciario

Duración: inferior a 10.000 años
Pérdida de especies: 75 %

Tasa de pérdida de especies:
15 % por milenio

Proceso actual

Comenzó hace 11.000 años
Pérdida de especies: sin determinar ?

Tasa de pérdida de especies:
Antes de la intervención humana:
0,01 % – 0,1 % por milenio
1900 – 2000:
1 % – 10 % por milenio
2000 – 2100 (previsión):
2 % – 20 % por milenio

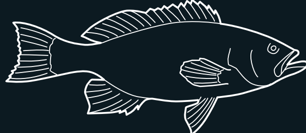
[MINERALES]

2030 >> ORO

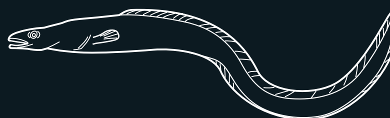
La crisis económica actual ha disparado la demanda de oro, ya que muchos lo perciben como una inversión palpable y de menor riesgo. Julian Phillips, editor de *Gold Forecaster*, calcula que en unos 20 años ya no será posible seguir extrayendo oro con facilidad.



ESTURION RUSO
La explotación de caviar ha mermado sus áreas de freza. Desde 1965, su población se ha reducido en un 90 por ciento.



CHERNA AMARILLA
Puede que ya sólo sobreviva en pequeñas zonas de su región de origen, entre Florida y Brasil.



ANGUILA EUROPEA
Sus poblaciones se han reducido un 80 por ciento desde 1968. Se trata de una especie que se reproduce a una edad avanzada, por lo que su recuperación quizá necesite unos 200 años.



PEZ RELOJ ANARANJADO
También conocido como perca emperador, desde el decenio de 1970 su presencia en las aguas neozelandesas se ha reducido en un 80 por ciento debido a la pesca con arrastreros de fondo.

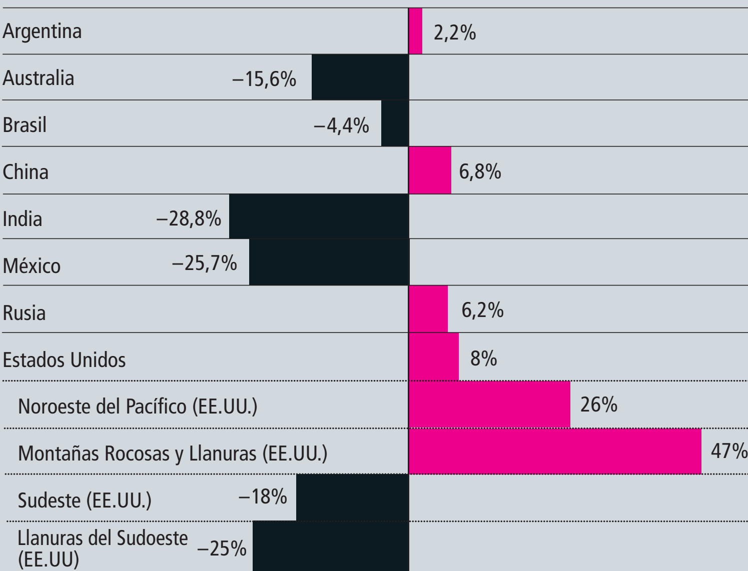
JASON LEE (*peces*)

[ALIMENTOS]

2050 >> ALIMENTAR UN PLANETA CALIENTE

Los expertos ya han comenzado a investigar la manera en que el calentamiento global afectará a la producción agrícola. Si bien en algunos países el cambio climático provocará estaciones de crecimiento más largas, en otros el calor hará más frecuentes las plagas o los fenómenos meteorológicos extremos. Parece que Rusia y China se beneficiarán al tiempo que India o México experimentarán dificultades. En EE.UU. se espera una mayor producción en la región de las Grandes Llanuras y una caída aún mayor que la actual en el sudoeste. En general, las naciones en vías de desarrollo serán las más perjudicadas. En torno a 2050 serán necesarios más de 7000 millones de dólares anuales para contrarrestar los efectos del cambio climático sobre la alimentación mundial.

Efectos en la agricultura del calentamiento global
Porcentaje estimado del cambio que hacia 2080 habrá experimentado la producción de los ocho mayores cultivadores del mundo



[MINERALES]

2044 >> COBRE

El cobre se emplea en casi todas las infraestructuras, desde las tuberías a los equipos eléctricos. Las reservas conocidas ascienden a 540 millones de toneladas, pero prospecciones geológicas recientes apuntan a unos 1300 millones de toneladas adicionales en la cordillera de los Andes.

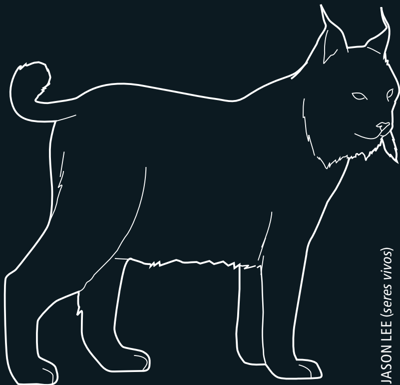
[BIODIVERSIDAD]

>> AMENAZAS MORTALES

Aunque el número total de especies se reduce (*véase el recuadro* "Extinción en masa"), algunas sufren más que otras. A continuación se detallan los porcentajes estimados de especies en peligro y algunos ejemplos de las amenazas que afrontan.

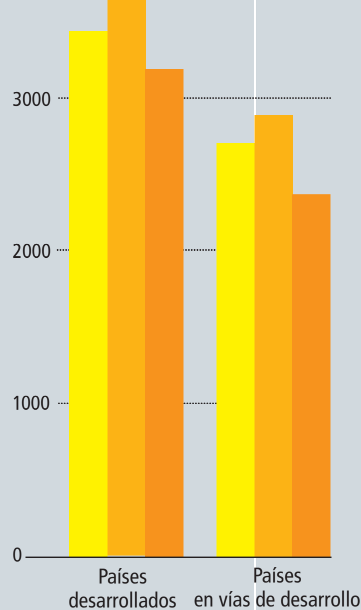
MAMIFEROS
18 por ciento en peligro

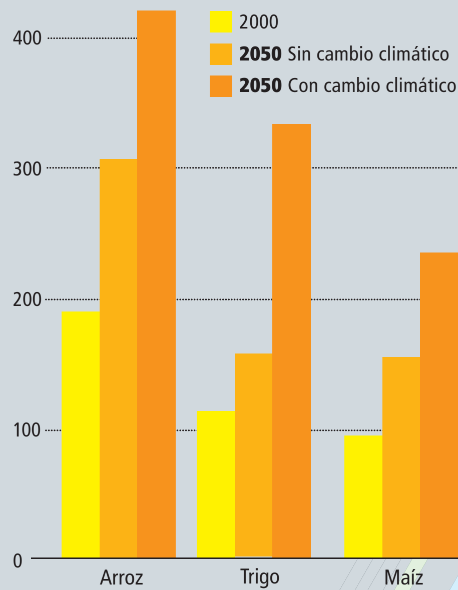
El lince ibérico se alimenta de conejos, los cuales escasean desde que en 1952 un pediatra introdujese en Francia cierta enfermedad originaria de Australia (la mixomatosis) para acabar con los conejos de su jardín.



JASON LEE (*seres vivos*)

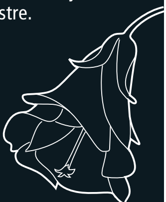
2050





PLANTAS
8 por ciento en peligro

Trochetiopsis erythroxylon es endémico de la isla de Santa Elena. Fue objeto de talas masivas debido a la excelente calidad de su madera. En el siglo xx sólo quedaba un ejemplar silvestre.





REPTILES
20 por ciento en peligro

La lagartija espinosa azul (*Sceloporus serrifer*) ha de retirarse del sol antes de calentarse demasiado. El aumento de las temperaturas ha reducido el tiempo durante el cual puede salir a buscar alimento.



AVES
10 por ciento en peligro

La grulla cuellinegra ha sufrido pérdidas de hábitat en los humedales de la meseta tibetana.



ANFIBIOS
30 por ciento en peligro

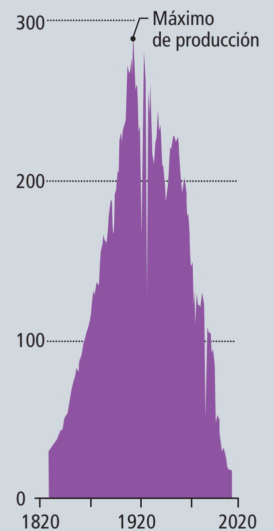
La rana de Archey se ha visto asolada por una enfermedad fúngica en su Nueva Zelanda nativa.

2060

[COMBUSTIBLES FOSILES]

2072 >> LIMITES DEL CARBON

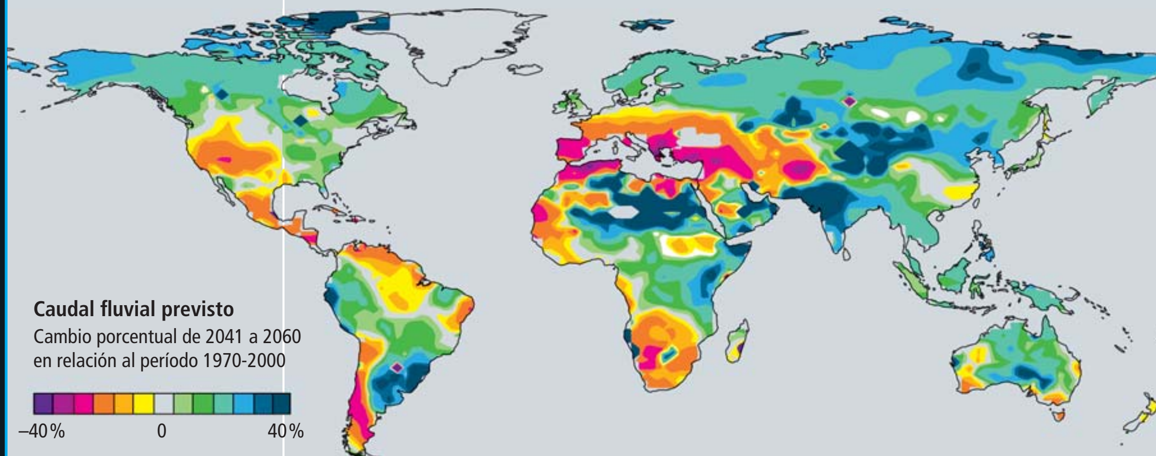
Existe la creencia generalizada de que, a diferencia del petróleo, el carbón es inagotable. Según David Rutledge, del Instituto de Tecnología de California, se trata de una percepción falsa. Los gobiernos tienden a sobrestimar de manera sistemática sus reservas en un factor de cuatro o superior, ya que asumen que los filones de difícil acceso quedarán algún día a merced de técnicas venideras. Los hechos demuestran que ello no ha ocurrido así. El Reino Unido (lugar de nacimiento de la minería del carbón) ofrece un buen ejemplo: la producción aumentó a lo largo del siglo XIX y principios del XX, pero después cayó cuando los recursos se agotaron. Las curvas de producción acumulada en el Reino Unido y en otras regiones exhiben una predecible forma de "S". Si tal tendencia se extrapola al resto de los yacimientos mundiales, Rutledge concluye que en 2072 habremos extraído el 90 por ciento de las reservas de carbón del planeta.



[AGUA]

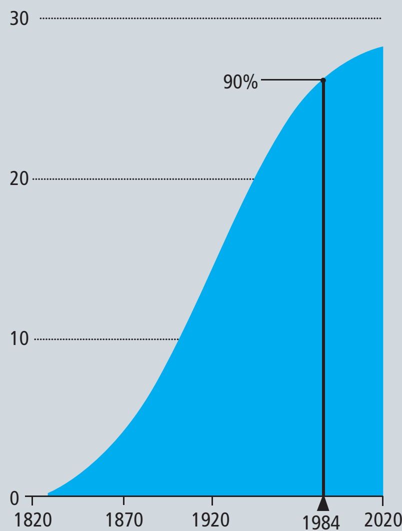
2060 >> CAMBIOS FLUVIALES

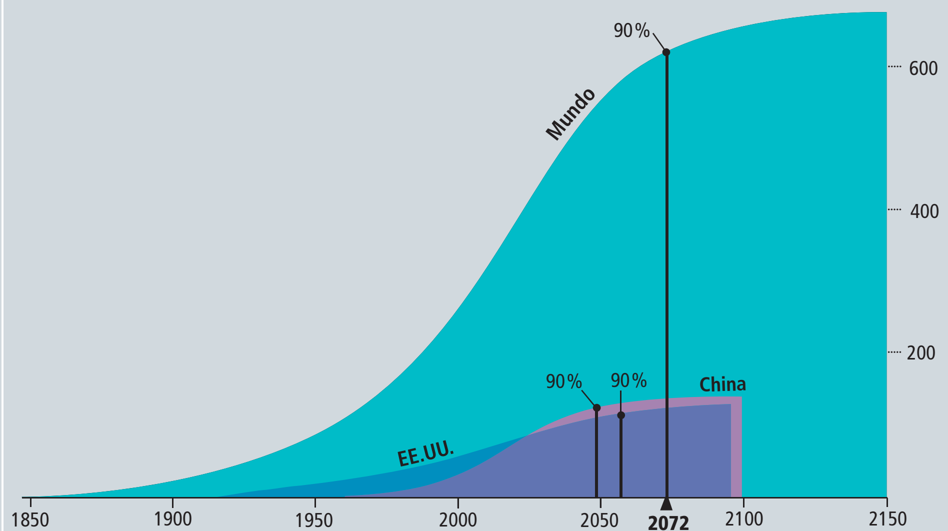
El cambio climático modificará los patrones meteorológicos. En algunas regiones, ello implicará grandes cambios en las precipitaciones y en la cantidad de agua disponible en ríos y arroyos. Expertos del Servicio de Inspección Geológica de EE.UU. promediaron los resultados de 12 modelos climáticos para predecir los cambios fluviales en los próximos 50 años. Mientras que Africa Oriental, Argentina y otras regiones verán aumentadas sus reservas de agua, Europa meridional y el oeste de EE.UU. experimentarán mermas.



JESSICA HUPPI (*mapa*)

2070





[AGUA]

2070 >> HIELO EN EL HIMALAYA

La nieve del Himalaya constituye una de las principales fuentes de agua para algunos de los mayores valles fluviales de Asia, como los del río Amarillo, el Yangtsé, el Mekong o el Ganges. En 2070 la masa del Himalaya cubierta de hielo podría haberse reducido en un 43 por ciento.

[AGUA]

2100 >> LOS ALPES

El aumento de las temperaturas en ciertas regiones alpinas es extremo. Puede que el glaciar del Ródano no sobreviva más de un siglo.

[MINERALES]

2560 >> LITIO

El litio es un componente esencial en las baterías de los coches eléctricos. Numerosos analistas han manifestado su preocupación de que los recursos no basten para satisfacer una demanda cada vez mayor. No obstante, y aún sin contar con la vasta cantidad presente en el agua de mar, las reservas de litio conocidas deberían de poder abastecernos durante más de cinco siglos.

[FUENTES]

AGUA *Global Glacier Changes: Facts and Figures*, UN Environment Program/World Glacier Monitoring Service, 2008. AQUASTAT Database, U.S. Food and Agriculture Organization. "Global Pattern of Trends in Streamflow and Water Availability in a Changing Climate", P. C. D. Milly y otros en *Nature*, vol. 438, 17 de noviembre de 2005.

ALIMENTOS *Climate Change Impact on Agriculture and Costs of Adaptation*, Gerald C. Nelson y otros, International Food Policy Research Institute, Washington DC, 2009. *Global Warming and Agriculture: Impact Estimates by Country*, W. R. Cline, Center for Global Development, Washington DC, 2007.

PETROLEO "Forecasting World Crude Oil Production Using Multicyclic Hubbert Model", I. S. Nashawi y otros en *Energy Fuels*, vol. 24, n.º 3, 18 de marzo de 2010.

CARBON David Rutledge, enviado para su publicación en *International Journal of Coal Geology*, 2010.

MINERALES *Mineral Commodity Summaries 2010*. US Geological Survey.

BIODIVERSIDAD "Consequences of Changing Biodiversity", F. Stuart Chapin III y otros en *Nature*, vol. 405, 11 de mayo de 2000. "Quantifying the Extent of North American Mammal Extinction Relative to the Pre-Anthropogenic Baseline", M. A. Carrasco y otros en *PLoS ONE*, vol. 4, n.º 12, 16 de diciembre de 2009. "Re-assessing Current Extinction Rates", N. E. Stork, en *Biodiversity Conservation*, vol. 19, n.º 2, febrero de 2010. "The Future of Biodiversity", S. L. Pimm y otros en *Science*, vol. 269, 21 de julio de 1995. "Are We in the Midst of the Sixth Mass Extinction? A View from the World of Amphibians", D. B. Wake y V. T. Vredenburg en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 105, suppl. 1, 12 de agosto de 2008.



[COSMOLOGIA]

¿Puede terminar el tiempo?

Sí y no. El final del tiempo se antoja por un lado imposible y, por otro, inevitable. Algunos avances recientes proponen una solución a esta paradoja

<< GEORGE MUSSER >>

CONCEPTOS BASICOS

- La teoría de la relatividad general predice que el tiempo acaba en ciertos momentos denominados singularidades. Ejemplos posibles los constituyen el centro de los agujeros negros o un eventual colapso del universo en una "gran implosión". Sin embargo, la teoría parece indicar que las singularidades carecen de sentido físico.
- Una forma de resolver la paradoja consiste en considerar una muerte gradual del tiempo. Este iría perdiendo sus atributos uno a uno: la direccionalidad, el concepto de duración y las relaciones causales. Finalmente, una física atemporal, más profunda, reemplazaría nuestra noción del tiempo.

Nuestra experiencia cotidiana nos dice que nada acaba por completo. Al morir, la materia de la que hoy se compone nuestro cuerpo regresará a la tierra y al aire y, antes o después, participará en la creación de nueva vida. En cierto modo, la existencia se perpetúa. Pero ¿continuará tal proceso indefinidamente? ¿Podría llegar un momento más allá del cual no hubiera ningún "después"? La física moderna sugiere una respuesta afirmativa: el mismo tiempo podría terminar. Toda actividad cesaría y no habría renovación ni recuperación.

La teoría en la que se basa nuestra comprensión actual de la gravedad (la relatividad general) contempla semejante panorama. Con anterioridad a Einstein se pensaba en el tiempo como en una especie de tambor universal, un son constante a cuyo ritmo marcha el cosmos sin variar, vacilar o detenerse. Pero Einstein demostró que ese ritmo del universo no es tan monótono. El tiempo puede frenarse o acelerarse. Según la relatividad general, la fuerza de la gravedad no es sino una manifestación de semejantes cambios de ritmo: los objetos en caída libre se ven atraídos hacia lugares en los que el tiempo transcurre más despacio. Por otra parte, no sólo el tiempo afecta a la dinámica de los cuerpos, sino que también la materia modifica el transcurso del tiempo; algo así como si hablásemos de percusionistas y bailarines que se influyen mutuamente. Es por ello que, en principio, cuando se somete la materia a circunstancias extremas, éstas pueden hacer que el tiempo se esfume por completo.

Cuando ello ocurre decimos que nos encontramos ante una *singularidad*. En realidad, el término se refiere a cualquier límite de la línea temporal, se trate de un principio o de un fin. La singularidad más conocida es, por supuesto, la gran explosión que hace 13.700 millones de años dio origen a nuestro universo y, con él, también al tiempo. Si alguna vez el universo deja de expandirse y comienza a contraerse, acabará sufriendo el proceso análogo a la gran explosión pero en sentido inverso: la "gran implosión" (*big crunch*). De ser así, el tiempo terminaría en ese momento.

Sin embargo, el tiempo no tiene por qué morir en todas partes. Según la relatividad general, el tiempo expira en el centro de un agujero negro, pero continúa fluyendo en el resto del universo. Los agujeros negros gozan de una bien merecida reputación destructiva, pero son aún peores de lo que suele pensarse.

HOLLY LINDEM





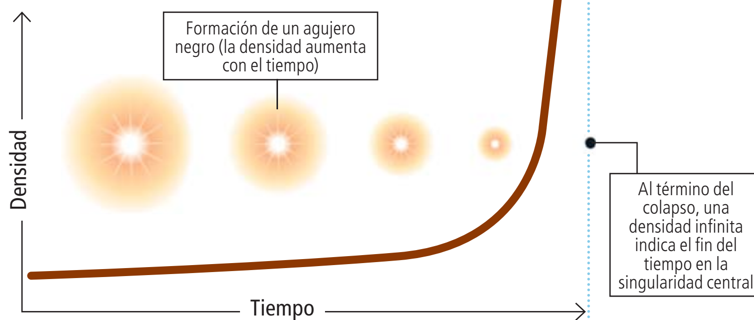




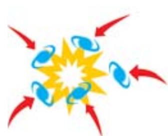


EL JUICIO FINAL

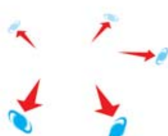
De acuerdo con la teoría de la relatividad general, el tiempo puede acabar de varias formas. Durante la formación de un agujero negro, por ejemplo, la densidad de materia en su centro aumenta y ello intensifica aún más la fuerza de la gravedad. El proceso continúa hasta que ambas cantidades se hacen infinitas en el centro del agujero negro, lo que se conoce como una singularidad (*derecha*). En la misma, el concepto de tiempo deja de tener sentido. Un destino similar podría aguardar al universo.



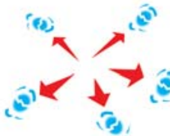
▼ **SERIOS PROBLEMAS PARA EL TIEMPO**



Gran implosión
La expansión cósmica se ralentiza, se detiene y da marcha atrás. El universo acaba colapsando en una singularidad que marca el final del tiempo. Aunque en su momento se creyó probable, hoy se duda que éste sea el destino del universo. La densidad de materia observada no basta para detener la expansión y, además, una forma de energía invisible (energía oscura) parece acelerar la expansión cósmica.



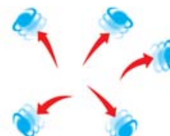
Gran frío
Se considera el final más probable. El universo se expande para siempre y queda cada vez más vacío. Aunque el tiempo no termina, su papel se torna irrelevante. El universo sufre una "muerte térmica", un estado de equilibrio carente de procesos o cambios. El tiempo pierde toda progresión clara y puede que carezca incluso de unidades de medida bien definidas.



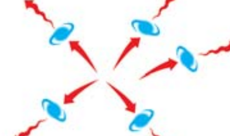
Gran desgarro
El universo se rasga en pedazos. Algo así ocurriría si (al contrario de lo que suponen la mayoría de los modelos) la energía oscura no fuese constante, sino que aumentase con el tiempo. La hipótesis, formulada en 1999, se conoce como "energía fantasma" (*phantom energy*). La expansión cósmica alcanza un ritmo infinito y acaba con el tiempo. Según algunos modelos, ocurriría dentro de unos veinte mil millones de años.



Gran congelación
El universo se llena de energía fantasma y alcanza una densidad infinita, pero no así su expansión, que permanece finita. Toda materia quedaría inmovilizada y el tiempo "se atascaría". Constituye una posibilidad en algunos modelos cosmológicos en los que nuestro universo es una especie de "membrana" inmersa en un espaciotiempo de más dimensiones.



Gran frenazo
La energía oscura pasa de acelerar la expansión cósmica a retardarla. En cierto momento, una desaceleración infinita frena la expansión de manera súbita. Tal posibilidad, propuesta por primera vez en 2004, implica fuerzas de marea divergentes. Aunque otras cantidades permanecen finitas, las consecuencias serían nefastas para el tiempo.



Gran sacudida
Postuladas en 2004, las "singularidades repentinas" no requieren energía oscura. La densidad de energía y la expansión se mantienen finitas, pero divergen las fuerzas de presión. El tiempo podría continuar o no. Según algunos modelos, un final así podría sobrevenir en tan sólo nueve millones de años.

JASON LEE

En caso de caer en un agujero negro no sólo seríamos hechos añicos: nuestros restos acabarían llegando a la singularidad situada en su centro, nuestra "línea de universo" (nuestra trayectoria en el espaciotiempo) terminaría y la materia de la que una vez estuvimos hechos jamás volvería a dar lugar a nada más.

Los físicos llevan decenios tratando de entender qué quiere decir que la teoría de la relatividad general admita la posibilidad de una muerte sin resurrección. De hecho, la existencia de singularidades en la teoría constituye una de las motivaciones principales para intentar formular una teoría unificada, con la esperanza de que una teoría cuántica de la gravedad resuelva lo que en la teoría clásica aparecen como singularidades matemáticas. Sin embargo, hay que ser cuidadoso con lo que se desea: el fin del tiempo resulta difícil de imaginar, pero un tiempo que nunca termina también da lugar a paradojas.

FRONTERAS DEL TIEMPO

Mucho antes de que Albert Einstein apareciera en escena, filósofos de todas las épocas ya habían considerado la posibilidad de que el tiempo acabase. Immanuel Kant catalogó el problema como una antinomia, una contradicción entre dos principios que permite argumentar a favor de cualquiera de ellos sin que resulte posible llegar nunca a una conclusión.

Por su parte, Aristóteles argumentó que el tiempo no podía tener ni principio ni fin. Cada momento representa el final de una era y, a la vez, el principio de otra. Es consecuencia de un suceso anterior y causa de otro posterior. ¿Cómo podría, pues, acabarse el tiempo? ¿Qué impediría a un presunto último suceso de la historia dar lugar a otro? Aún más, el mismo concepto de "final" presupone la existencia del tiempo. ¿Cómo definir entonces el final del tiempo? Richard Swinburne, filósofo de la Universidad de Oxford, opina que, desde un punto de vista lógico, la idea de que el tiempo termine carece de sentido. Sin embargo, un tiempo sin final implicaría un universo cuya existencia habría de prolongarse hasta el infinito. Ello acarrea toda una serie de problemas derivados de la idea de infinito, un concepto que para muchos filósofos no pasa de una idealización matemática.

Nadie parece tener muy claro en qué consiste exactamente una singularidad. "La física que se esconde detrás constituye una cuestión abierta", afirma el filósofo de la física Lawrence Sklar, de la Universidad de Michigan en Ann Harbor. Además, se diría que la misma teoría que engendró las singularidades apunta a que, en realidad, las mismas no pueden existir. En el momento de la gran explosión, la relatividad general nos

dice que todo el universo, con todas sus galaxias y todo lo que observamos hoy día, se hallaba comprimido en un mismo punto. No hablamos de una minúscula cabeza de alfiler, sino de un verdadero punto de volumen cero. De igual modo, toda la materia que haya caído en un agujero negro habría de colapsar en un punto. En ambos casos, el cálculo de la densidad arroja un valor divergente. Existen otras clases de singularidades que no implican una densidad de materia infinita, pero sí la divergencia de otras cantidades físicas.

Aunque los físicos contemporáneos no sienten la misma aversión hacia el infinito que Aristóteles o Kant, la aparición de cantidades divergentes se suele considerar una indicación de que la teoría es insuficiente o se ha extrapolado más allá de sus límites de validez. La relatividad general no es ni mucho menos el único ejemplo de una teoría con infinitos. Consideremos la teoría clásica que describe la propagación de un rayo de luz. Si bien la misma explica de manera excelente el funcionamiento de unas gafas o de unos espejos de feria, también predice que una lente focaliza los rayos de luz de una fuente lejana en un único punto matemático. Si interpretamos al pie de la letra lo que nos dice la teoría de rayos de luz, la intensidad de la radiación se hace infinita en ese punto; algo que, desde luego, no ocurre. En este caso, la explicación reside en que, a distancias muy cortas, la óptica de rayos falla porque la luz no se propaga en forma de rayos (otra idealización matemática), sino de ondas. Algo parecido podríamos decir también de las cargas o masas puntuales que emplea la mecánica clásica, las cuales no son sino modelos ideales de densidad infinita.

Del mismo modo, la mayoría de los expertos asumen que las singularidades cósmicas apuntan a la existencia de regiones de densidad muy elevada pero finita al fin y al cabo. Allí la relatividad general fallaría al no capturar algún aspecto crucial de la gravedad o la materia a distancias cortas. "La mayoría de la gente diría que las singularidades señalan los lugares en los que la teoría se desmorona", comenta James B. Hartle, físico de la Universidad de California en Santa Barbara.

Por tanto, para saber con exactitud qué ocurre, haría falta una teoría más completa: una teoría cuántica de la gravedad. Semejante teoría habría de incorporar un aspecto fundamental de la mecánica cuántica: la naturaleza ondulatoria de la materia. Ello quizá remediase las singularidades de la teoría clásica al reemplazar lo que antes era un punto por regiones de tamaño finito. De esta manera, desterraría el error de dividir por cero y el tiempo no tendría por qué terminar.

Existen partidarios de ambas posturas. Hay quienes opinan que el tiempo sí acaba. El problema de esta opción radica en que las leyes de la física describen la manera en que los cuerpos se mueven y evolucionan *en* el tiempo. Por tanto, el principio o el final del tiempo se hallan fuera del ámbito de las leyes de la física que conocemos. Habrían de quedar descritos no por una nueva ley de la física, sino por algún nuevo tipo de ley que prescinda de conceptos temporales como el movimiento o el cambio y que se base en relaciones atemporales, como la elegancia geométrica.

En 2007, Brett McInnes, de la Universidad Nacional de Singapur, se basó en ideas de la teoría de cuerdas (hoy en día, el principal candidato a una teoría cuántica de la gravedad) y propuso reemplazar la pequeña "bola" primordial del universo por un espacio de geometría toroidal (el tipo de geometría

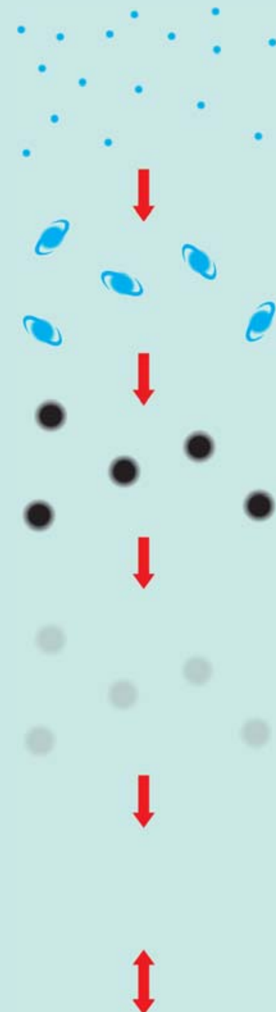
DESAPARICION PAULATINA DEL TIEMPO

El fin del tiempo podría acontecer de manera gradual. Poco a poco, el universo adoptaría un estado en el que el concepto de tiempo cada vez tendría menos sentido. La secuencia que mostramos aquí y en las páginas siguientes no es inflexible; los pasos podrían solaparse u ocurrir en un orden distinto.

FIN DE LA FLECHA TEMPORAL



El tiempo dejaría de correr hacia delante si el universo agotase su energía útil y dejara de evolucionar. A partir de ese momento, la única actividad consistiría en fluctuaciones aleatorias de la densidad de materia o energía. Los relojes, en caso de quedar alguno, se limitarían a oscilar de un lado para otro. Aunque la situación que se muestra abajo describe un universo que se expande eternamente, el tiempo también podría perder su direccionalidad en otros casos.



El universo comienza como una nube muy densa de partículas.

Se forman estructuras debido a la fuerza de la gravedad.

La materia colapsa y forma agujeros negros.

Poco a poco, los agujeros negros emiten radiación y acaban por desaparecer.

La radiación se disipa.

A partir de ahí, nada cambia gran cosa.

JASON LEE

LA IMPOSIBILIDAD DE MEDIR EL TIEMPO



El concepto de duración perdería su significado si desapareciesen todos los sistemas físicos que permiten delimitar intervalos regulares de tiempo. En un escenario similar al anterior, la energía que escapase de los agujeros negros (fotones y otras partículas sin masa) carecería de una escala fija y de cualquier dinámica relevante, por lo que no podría emplearse para medir intervalos temporales.

La materia se desintegra y es absorbida por los agujeros negros.

Los agujeros emiten radiación, pero ésta no puede emplearse para construir relojes ni equivalentes naturales.

JASON LEE

que exhibe la cobertura de azúcar de un *dónut*, por ejemplo). En virtud de los teoremas matemáticos aplicables a tales superficies, demostró que la física de la "singularidad" inicial se tornaba uniforme y suave. En cambio, según su modelo, una eventual gran implosión o el centro de un agujero negro podrían adoptar cualquier otra geometría, por lo que el razonamiento que eliminaba las singularidades en el origen del universo no resultaba aplicable a esos casos. Vemos por tanto que semejante ley geométrica difiere de las leyes físicas habituales de manera sustancial, ya que no se muestra simétrica con respecto al tiempo (la gran explosión y la gran implosión no se regirían por los mismos principios).

También hay quien opina que el tiempo es eterno en las dos direcciones, sin principio ni fin. En tal caso, la gran explosión habría consistido, más que en un "principio de los tiempos", en una brusca transición de fase en la vida de un universo eterno [*véase* "¿Es la teoría de cuerdas una ciencia?", por D. Lüst; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 2010]. Tal vez, antes de la gran explosión el universo haya experimentado una gran implosión y, cuado la densidad se hizo demasiado alta, comenzó a expandirse de nuevo; algo que ha dado en llamarse el "gran rebote" (*big bounce*). Puede incluso que algunas reliquias de esta pre-historia hayan sobrevivido hasta nuestros días [*véase* "Rebote del universo", por Martin Bojowald; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre 2008]. En el caso de los agujeros negros resulta posible imaginar procedimientos análogos que, en principio, resolverían también el problema de las singularidades presentes en su interior.

Los defensores de un tiempo eterno evitan la necesidad de especular acerca de un nuevo tipo de leyes físicas. Pero entonces aparecen otros problemas. Según todo lo que sabemos, la segunda ley de la termodinámica afirma que el desorden en el universo crece de manera constante. Si eso es así y el universo ha existido desde siempre, ¿por qué en la actualidad no se halla completamente desordenado?

Parece pues que los físicos actuales se enfrentan a la misma antinomia de la que hablaba Kant. El difunto John Archibald Wheeler, uno de los pioneros en los intentos de cuantizar la gravedad, escribió que "las ecuaciones de Einstein afirman que 'este es el fin', pero la física dice que 'no hay fin'". Ante semejante dilema, hay quien se encoge de hombros y concluye que la ciencia jamás podrá resolver la cuestión; que los límites del tiempo son también los de la razón y la observación empírica. Pero también hay quien piensa que lo único que requiere el problema son ideas nuevas. En la opinión de Gary Horowitz, físico teórico de la Universidad de California en Santa Bárbara, la cuestión no se halla fuera del ámbito de la física. La gravedad cuántica debería dar una respuesta concreta.

EL TIEMPO SE ESCAPA

A pesar de ser un ordenador, HAL 9000 era tal vez el personaje más humano de *2001: Una odisea en el espacio.* Expresivo, ingenioso, un manojo de cables pero también de contradicciones. Hasta su muerte evocaba la de un hombre. A medida que Dave iba desconectando sus circuitos, HAL perdía sus facultades mentales una por una al tiempo que expresaba su regresión como pocos humanos lo harían. La vida constituye una compleja proeza organizativa, la más complicada de cuantas la ciencia ha conocido. Aparece y se extingue en la penumbra de lo que llamamos vida y no-vida.

Hay quien encuentra un paralelismo entre los límites del tiempo y los de la vida. Del mismo modo que la vida surge a partir de la organización de moléculas inertes, quizás el tiempo también emerja desde una realidad atemporal que, de algún modo, adquiere un orden [*véase* "¿Es el tiempo una ilusión?", por C. Callender; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 2010]. Un mundo dotado de tiempo exhibe una estructura de enorme complejidad. El tiempo indica cuándo ocurren los acontecimientos, cuánto duran y en qué orden se suceden. Quizá semejante estructura temporal haya surgido de manera autónoma. Y lo que puede hacerse, también puede deshacerse. Si esa estructura se desmoronase, el tiempo terminaría.

Desde ese punto de vista, la muerte del tiempo no resultaría más paradójica que la desaparición de cualquier otro sistema complejo. Uno a uno, el tiempo perdería sus rasgos distintivos y cruzaría la penumbra de la existencia a la no existencia.

Lo primero en desaparecer podría ser la unidireccionalidad, la "flecha" que apunta del pasado al futuro. Desde el siglo XIX se reconoce que esa flecha no es una propiedad del tiempo en sí, sino de la materia. El tiempo es intrínsecamente bidireccional, y la flecha que percibimos no es más que la evolución de la materia desde un estado de orden hacia otro caótico. El

"orden primigenio" podría deberse a principios geométricos como los invocados por McInnes. Y, en caso de persistir la tendencia al desorden, el universo se aproximaría cada vez más a un estado de equilibrio o "muerte térmica" de máximo caos. Las partículas se mezclarían unas con otras y, a partir de cierto momento, el futuro sería a todos los efectos indistinguible del pasado: cualquier reloj superviviente oscilaría de forma errática de un lado para otro [*véase* "El origen cósmico de la flecha del tiempo", por Sean M. Carroll; Investigación y Ciencia, agosto 2008]. Se ha especulado con que la flecha del tiempo podría llegar a invertirse, con lo que el universo comenzaría a ordenarse. Pero para las criaturas mortales, cuya existencia depende de una flecha del tiempo orientada "hacia delante", semejante inversión supondría un final del tiempo tan contundente como una muerte térmica.

PERDER LA NOCION DEL TIEMPO

La direccionalidad no es el único rasgo que el tiempo perdería durante su proceso de extinción. Lo mismo ocurriría con el concepto de duración. El tiempo que conocemos se nos presenta en intervalos como segundos, días o años. Pero, de no ser así, no lograríamos establecer la duración de los acontecimientos. Este es el escenario propuesto por Roger Penrose, físico teórico de la Universidad de Oxford, en su nueva obra *Cycles of time: An extraordinary new view of the universe* (2010).

En el decenio de los sesenta, Penrose y Stephen Hawking, de la Universidad de Cambridge, demostraron una serie de teoremas que establecían que, bajo condiciones bastante generales, la existencia de singularidades constituye un fenómeno común en el marco de la relatividad general. Penrose también ha argumentado que la materia que cae en un agujero negro perece de manera definitiva y que una teoría física fundamental no parece dejar lugar al concepto de tiempo.

En su último ataque, Penrose comienza con una observación básica sobre la naturaleza del universo primitivo. En un principio, el cosmos no era sino un agregado de sus ladrillos constituyentes: una sopa de quarks, electrones y otras partículas elementales. A partir de ellas fueron surgiendo estructuras como los átomos, las moléculas, las estrellas o las galaxias. Las primeras estructuras aparecieron unos diez microsegundos después de la gran explosión (o gran rebote, o lo que quiera que hubiese): fueron los protones y los neutrones, compuestos por tres quarks cada uno y con un tamaño del orden de un femtómetro (10^{-15} metros).

Pero, antes de eso, no había estructura alguna. No existía ningún sistema estable compuesto por unas piezas ligadas a otras, por lo que ningún cuerpo o proceso podía cumplir la función de un reloj. Las oscilaciones de un reloj requieren alguna referencia bien definida, como la longitud de un péndulo, la separación entre dos espejos o el tamaño de los orbitales atómicos. Sin embargo, tales sistemas aún no existían. Los quarks y electrones individuales no sirven como referencia porque carecen de tamaño: por más que nos acerquemos a uno, sólo apreciamos un punto. La única escala de longitud que puede asociarse a tales partículas es su longitud de onda de Compton, la cual determina la escala de los efectos cuánticos y es inversamente proporcional a la masa de las partículas. Pero ni siquiera esa escala rudimentaria podía definirse antes de unos 10 picosegundos después de la gran explosión, ya que el proceso que dota de masa a las partículas aún no había tenido lugar.

"No podía haber ningún tipo de reloj; ninguna manera de llevar una cuenta temporal", explica Penrose. Sin nada capaz de señalar intervalos de tiempo regulares, el transcurso de un attosegundo o de un femtosegundo no representaría ninguna diferencia para las partículas de la sopa primordial.

Penrose propone que semejante situación no sólo describe los orígenes del universo, sino también su futuro lejano. Largo tiempo después de que todas las estrellas se extingan, el universo se llenará de agujeros negros y partículas sueltas. Más tarde, incluso los agujeros negros se desintegrarán y sólo quedarán las partículas. La mayoría de ellas carecerán de masa, como los fotones, y de nuevo resultará imposible construir relojes. En otros escenarios futuros, como el que describe la gran implosión, a los relojes tampoco les va mucho mejor.

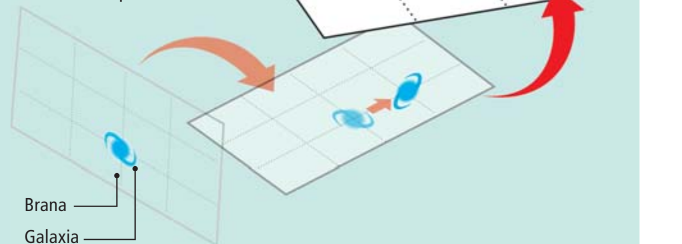
Podríamos suponer que el concepto abstracto de duración quizá siguiese teniendo algún sentido aunque no exista nada que pueda medirlo. Sin embargo, es más que cuestionable hablar de la existencia de una cantidad que resulta (y no

EL TIEMPO SE TORNA ESPACIO

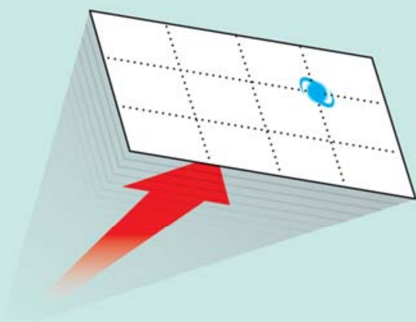
El tiempo podría convertirse en una dimensión espacial más, con lo que desparecerían las conexiones causales. Ello podría ocurrir si nuestro universo fuese una *brana*: un hiperplano que flota en un espaciotiempo de más dimensiones. En tal caso, existiría la posibilidad de que dicha brana modificase su orientación y que su dirección temporal se alinease con una de las direcciones espaciales extra.



Nuestra brana flota en un espaciotiempo de dimensión mayor. No podemos escapar, pero sí desplazarnos sobre ella sin problemas…



…pero si la brana adopta ciertas orientaciones o se deforma, moverse sobre ella implicaría tener que viajar más rápido que la luz. Puesto que ello resulta imposible, nos quedaríamos bloqueados en el sitio.



JASON LEE

sólo en la práctica, sino en principio) imposible de medir. Esto último supondría un indicio de que el propio tiempo ha perdido uno de sus rasgos distintivos. “Si el tiempo es lo que mide un reloj y no hay relojes, entonces no hay tiempo”, concluye el filósofo Henrik Zinkernagel, de la Universidad de Granada, quien también ha considerado la ausencia de tiempo en el universo primitivo.

El escenario de Penrose tiene también sus puntos débiles. No todas las partículas en el universo futuro carecerán de masa; al menos algunos electrones sobrevivirán y servirían como relojes. Penrose conjetura que, de alguna manera, acabarían perdiendo su masa, pero admite pisar terreno resbaladizo. “Es uno de los aspectos más incómodos de la teoría”, reconoce. Por otro lado, si en el universo primitivo no había ninguna noción de escala, ¿cómo pudo expandirse, diluirse y enfriarse?

En cualquier caso, aunque se diría que el denso universo primitivo y el cada vez más diluido universo futuro representan polos opuestos, ambos parecen hallarse desprovistos de relojes y de otras medidas de escala. “La gran explosión se parece mucho al futuro remoto”, afirma Penrose, quien especula con la idea de que ambos extremos quizá representen el mismo punto dentro de un gran ciclo cósmico. Cuando el tiempo acabe, el bucle podría cerrarse con una nueva gran explosión. Lo curioso es que, de ser así, el tiempo no moriría, sino que volvería a surgir de nuevo.

EL TIEMPO SE DETIENE

Aunque el concepto de duración carezca de significado y los femtosegundos se confundan con los attosegundos, eso no implica una muerte total del tiempo. Aún podrían sobrevivir las relaciones de causa y efecto. En este respecto, tiempo y espacio exhiben una diferencia fundamental. A diferencia del tiempo, el espacio no impone relaciones de causa y efecto. Cuando un suceso (causa) implica necesariamente a otro (efecto), su separación es siempre temporal: un rayo cae sobre un árbol y, un instante después, éste arde. La colocación inversa de ambos acontecimientos en la línea temporal (el árbol arde antes de que caiga el rayo) es imposible. Sin embargo, dos acontecimientos separados por una distancia puramente espacial (un suceso en la Tierra y otro que, en el mismo instante, ocurre en un planeta lejano) nunca guardan relaciones de causa y efecto, y sí pueden intercambiar sus posiciones espaciales.

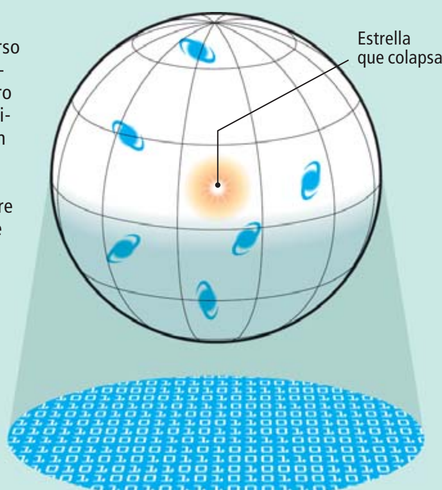
Sin embargo, en determinadas circunstancias, el tiempo podría perder tal noción básica de ordenación y convertirse en una mera dimensión espacial más. La idea se remonta a los años ochenta, cuando Stephen Hawking y James Hartle intentaron explicar la gran explosión como el momento en el que el tiempo se diferenció del espacio. En 2007, Marc Mars, de la Universidad de Salamanca, junto con José M. M. Senovilla y Raül Vera, de la Universidad del País Vasco, aplicaron una idea semejante no al origen, sino al final del tiempo.

Su modelo se inspira en la teoría de cuerdas y en la idea de que nuestro universo podría ser una *brana* o hiperplano de cuatro dimensiones (tres espaciales y una temporal) inmerso en un espaciotiempo mayor (según la teoría de cuerdas, de diez dimensiones: nueve espaciales y una temporal).

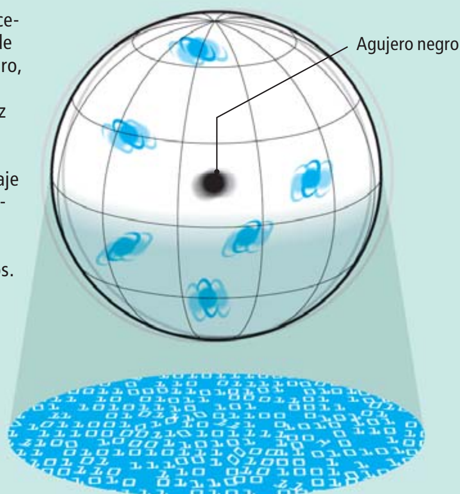
Según tales modelos, nosotros nos hallamos confinados en dicho hiperplano y, en condiciones normales, gozamos de libertad para movernos dentro de los límites de nuestra prisión de cuatro dimensiones. Pero si nuestra brana adopta-

LA GEOMETRIA SE DISUELVE

El tiempo desaparecería por completo y los procesos se tornarían tan complejos que no podría decirse que aconteciesen ni en lugares ni en momentos específicos. En otras palabras, se desmoronaría la descripción geométrica de la realidad. Una forma de comprender esta idea es considerar el colapso de un agujero negro desde el llamado “principio holográfico” (*abajo*).



Nuestro universo podría ser bidimensional, pero ciertas regularidades lo harían aparecer tridimensional, al igual que ocurre con la placa de un holograma.



Durante el proceso de colapso de un agujero negro, el universo se vuelve cada vez más caótico. La localización y el cronometraje de los acontecimientos se van haciendo más y más ambiguos.



Al formarse la singularidad, el complejo mecanismo en 2D que generaba la dimensión holográfica “extra” colapsa. La descripción del mundo en 3D se viene abajo y, con ella, toda la descripción geométrica del mundo, incluida la existencia de una coordenada temporal.

JASON LEE

se una determinada orientación en el espaciotiempo de diez dimensiones, de tal modo que lo que era nuestra dirección temporal se alinease con una de las direcciones espaciales extra, desplazarnos a lo largo de la brana (nuestro propio universo) exigiría una velocidad mayor que la de la luz. Dado que tal cosa no es posible, el universo se paralizaría.

Visto "desde fuera", la brana seguiría teniendo cuatro dimensiones, pero todas serían espaciales. Mars explica que la brana obligaría a los objetos a moverse a velocidades cada vez más próximas a la de la luz. Al final, sus trayectorias se inclinan tanto que se tornan superlumínicas. El tiempo desaparecería, pero lo interesante es que, desde el interior de la brana, quizá nadie se diese cuenta de lo que ocurre.

Dado que todos los relojes se irían frenando hasta detenerse, no habría forma de averiguar que el tiempo se está transformando en espacio. Lo que sí veríamos es que los objetos parecerían acelerarse. Y, de hecho, ése es exactamente el comportamiento observado en las galaxias lejanas. La expansión acelerada del universo ha venido atribuyéndose a una forma misteriosa de energía denominada "energía oscura" [*véase* "Cuestiones fundamentales de cosmología", por P. Schneider, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 2010]. Pero ¿podría deberse a una desaparición paulatina del tiempo?

SE ACABO EL TIEMPO

Pero, aunque desapareciesen las relaciones causales, quizás aún fuese posible localizar acontecimientos en momentos bien definidos a lo largo del mismo eje al que antes denominábamos "temporal". Sería análogo a situar dos objetos en posiciones concretas a lo largo de una regla: la noción de causa y efecto se habría perdido, pero no así la idea geométrica de localización.

Tampoco queda claro que una idea tan básica como ésa sea intocable. En los últimos años, Emil J. Martinec y Savdeep S. Sethi, de la Universidad de Chicago, Daniel Robbins, de la Universidad de Texas A&M, Gary Horowitz y Eva Silverstein, de la Universidad de Stanford, y Albion Lawrence, de la Universidad de Brandeis, entre otros expertos, han investigado lo que ocurre con el tiempo en las singularidades de los agujeros negros mediante una de las ideas más poderosas de la teoría de cuerdas: el principio holográfico.

La característica particular de un holograma consiste en que, a pesar de ser bidimensional, consigue recrear una imagen en tres dimensiones. En algunos casos, la teoría de cuerdas permite un mecanismo parecido: un intrincado sistema de partículas cuánticas puede dar lugar a una dimensión espacial "extra" que no existe en el sistema original [*véase* "El espacio, ¿una ilusión?", por J. Maldacena; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 2006].

Pero no todas las imágenes son hologramas. Para provocar una sensación tridimensional, un holograma ha de estar diseñado con sumo cuidado. Si, por ejemplo, la imagen bidimensional se raya, la ilusión en tres dimensiones se desvanece. Del mismo modo, no todos los sistemas de partículas dan lugar a una dimensión extra y a un universo como el nuestro. La física del sistema de partículas ha de satisfacer una serie de características. Si un sistema carece inicialmente de las regularidades necesarias pero las desarrolla con posterioridad, aparecerá una nueva dimensión espacial. Y si el sistema vuelve a desordenarse, la dimensión "holográfica" desaparecerá de nuevo.

Imaginemos, pues, el colapso de una estrella que se convierte en un agujero negro. Según el formalismo holográfico que acabamos de exponer, la estrella parece tridimensional, pero en realidad se corresponde con cierta configuración de partículas en un sistema de dos dimensiones. A medida que el sistema colapsa, la gravedad del sistema tridimensional se intensifica y, en la descripción holográfica equivalente, la dinámica del sistema cuántico bidimensional también se va alterando de modo paulatino. Pero las novedades aparecen cuando se forma la singularidad del agujero negro: en ese momento, el orden en el sistema cuántico de partículas se viene abajo por completo, el holograma "se raya" y la tercera dimensión desaparece.

Pero si eso pasa, lo mismo le ocurre al tiempo. Cuando caemos en un agujero negro, el ritmo al que avanza nuestro reloj depende de la distancia a la que nos encontramos del centro. Pero dicha distancia se encuentra definida en un espacio de tres dimensiones que incluye la dimensión holográfica. De esta manera, cuando esa dimensión se desvanece, nuestro reloj gira sin control, ya que resulta tan imposible asignar posiciones definidas a los objetos como localizar en el tiempo los acontecimientos. "La noción geométrica convencional del espaciotiempo deja de ser válida", explica Martinec.

A efectos prácticos, todo ello quiere decir que el espacio y el tiempo ya no aportan ninguna estructura. Ocurrirían cosas como que, al intentar medir la posición de los objetos, éstos aparecerían ubicados en más de un lugar al mismo tiempo, o que la separación espacial no les afectaría y saltarían de un lugar a otro sin cruzar la distancia intermedia.

De acuerdo con estas ideas, la teoría de cuerdas no se limitaría a reemplazar la singularidad puntual por un *locus* regular sin alterar demasiado el resto del universo. En lugar de eso, parece decirnos que toda la descripción en términos de espacio y tiempo se viene abajo, y que esos efectos persisten aun lejos de la singularidad.

No obstante, las descripciones holográficas de este estilo todavía requieren la existencia de una noción de tiempo en el sistema de partículas cuánticas definido en una dimensión menos. Algunos expertos intentan desarrollar una nueva noción de dinámica que no presuponga ningún tiempo en absoluto. Pero, hasta que eso no se consiga, el tiempo continuará tan profundamente aferrado a todas nuestras nociones físicas que resulta harto difícil imaginar su desaparición definitiva.

Para abarcar lo que parecía inabarcable, la ciencia descompone los fenómenos complejos en sus partes más básicas y describe grandes viajes como una sucesión de pasos simples. Puede que hacer lo mismo con el tiempo nos permita algún día entender su naturaleza.

PARA SABER MAS

TOWARD THE END OF TIME. Emil J. Martinec, Daniel Robbins y Savdeep Sethi en *Journal of High Energy Physics*, vol. 2006, n.º 8; agosto, 2006.

IS THE ACCELERATED EXPANSION EVIDENCE OF A FORTHCOMING CHANGE OF SIGNATURE ON THE BRANE? Marc Mars, José M. M. Senovilla y Raúl Vera en *Physical Review D*, vol. 77, n.º 2; enero, 2008.

CYCLES OF TIME: AN EXTRAORDINARY NEW VIEW OF THE UNIVERSE. Roger Penrose. Bodley Head, 2010.

[FUTURO]



Una mirada al porvenir

Todo final trae consigo un nuevo comienzo.
¿Qué acontecimientos perfilarán el mundo en los próximos decenios?
Algunos expertos nos dan su opinión

ILUSTRACIONES DE JASON HOLLEY

[SISTEMAS COMPLEJOS]

LA JUNGLA DIGITAL

■ **DANNY HILLIS**

El 19 de noviembre de 2009, uno de los circuitos impresos de un enrutador en Salt Lake City falló. El error se propagó en cadena e impidió la comunicación entre ordenadores de control del tráfico aéreo en todo el territorio estadounidense. Cientos de vuelos fueron cancelados. El 6 de mayo de 2010, el índice bursátil Dow Jones se derrumbó casi 1000 puntos en cuestión de minutos sin explicación alguna. De no haberse recuperado por sí mismo antes de cerrar la jornada, a esta "caída relámpago" (*flash crash*) habría seguido un colapso financiero mundial.

Hoy en día, nuestros destinos se hallan vinculados a las máquinas que manejamos. Pero la tecnología ha evolucionado tanto que ya nadie la comprende ni la controla por completo. Acabamos de entrar en lo que podríamos denominar la "Era de la Maraña Digital".

Cuando vivíamos en los bosques, los humanos asignábamos un origen místico a los fenómenos naturales. Durante la Edad Media se culpaba a los dioses de las desgracias que abatían el devenir humano. Pero la llegada de la Ilustración introdujo la razón en escena: el análisis científico nos ayudó a entender el mundo que nos rodea y esa comprensión nos proporcionó los medios para rodearnos de un complejo entorno técnico hecho a nuestra medida.

Internet ofrece un buen ejemplo. Muchas personas tal vez no sean conscientes de que dependen de Internet cuando llaman por teléfono o cuando toman un avión. En un mundo tan interconectado como el nuestro, cada vez resulta más difícil comprender todos los sistemas que hemos construido o el modo de repararlos cuando fallan. Semanas después del desastre financiero, se instalaron circuitos de bloqueo con la esperanza de evitar colapsos similares en el futuro, pero hoy nadie puede asegurar que, llegado el momento, funcionarán de la manera correcta.

En el siglo XX, los programadores daban instrucciones precisas al ordenador y ejercían un control absoluto sobre un sistema que conocían por completo. Hoy, en cambio, han de trabajar con módulos complejos desarrollados por terceros, sin entender el funcionamiento del conjunto. Un programa que dirija los camiones de una empresa hacia sus almacenes para reponer mercancías necesita localizar los camiones y los almacenes, cartografiar calles e inventariar materiales. El programa organiza toda esa información mediante la conexión por Internet con otros sistemas. También podría emplearse para seguir los envíos, controlar las tarifas de los conductores o encargarse del mantenimiento de los vehículos.

Si ampliamos la escena e incluimos fábricas, centrales eléctricas, vendedores, publicistas, agentes de seguros, administrativos y corredores de bolsa, comenzaremos a percibir el enmarañado sistema que, día a día, sustenta tal cúmulo de decisiones. Y, pese a haberlo creado, no podemos decir que lo hayamos diseñado. Tal sistema es el fruto de una evolución. Dependemos de él y no lo gobernamos por completo. Cada experto conoce una pieza del rompecabezas, pero el total se antoja demasiado grande para que nadie pueda abarcarlo.

Es hora de emprender el camino inverso. Deberíamos construir sistemas de apoyo sencillos y comprensibles por parte de una sola persona. Hace no tantos años, los radioaficionados podían mantener las conexiones mundiales si las comunicaciones comerciales fallaban. Habría que desarrollar un sistema de comunicación sencillo que, independiente de Internet, estuviese capacitado para mantener la actividad de la sociedad civil tras un eventual ataque cibernético o cualquier fenómeno imprevisto que colapsase el ciberespacio.

A medida que nos percatemos de nuestro regreso a los bosques —en este caso, a una jungla digital de creación propia—, habrá quien recupere el enfoque espiritual. La mayoría, sin embargo, aceptará sin más la complejidad y aprenderá a servirse de ella. Otros intentarán "desconectarse", pero muy pocos prescindirán del acceso a la Red o a los teléfonos móviles, del mismo modo que tampoco prescinden del alumbrado eléctrico o de la penicilina.

Queramos o no, todas esas dependencias se han hecho demasiado fuertes para que logremos desligarnos de ellas. Se ha forjado una intrincada maraña entre nuestros destinos individuales y las técnicas que hemos creado.

DANNY HILLIS es cofundador de la Long Now Foundation. Predijo con gran acierto que el temido "efecto 2000" no causaría problemas.

[BIOTECNOLOGIA]

VIDA DE DISEÑO

■ **ARTHUR CAPLAN**

El pasado mes de mayo, John Craig Venter anunciaba la creación de una bacteria a partir de un genoma que él y sus colaboradores descodificaron, reconstruyeron artificialmente e introdujeron luego en los restos de lo que una vez había sido una *Mycoplasma*, cuyo núcleo habían extraído con anterioridad. El híbrido, convertido en el primer organismo artificial, arrinconaba la antigua creencia de que sólo una divinidad o alguna fuerza especial tenía el don de encender la chispa de la vida.

El acontecimiento supuso la demostración más impresionante hasta la fecha del vigor de la biología sintética, una nueva disciplina que promete resolver muchos de nuestros problemas más acuciantes. Hoy los científicos aspiran a crear bacterias que digieran la contaminación o el petróleo procedente de vertidos; otras que generen hidrógeno o combustibles líquidos a partir de la luz solar, o que den cuenta del colesterol y demás sustancias nocivas que acumula nuestro cuerpo.

Si bien aún en sus comienzos, dichas técnicas requieren la máxima vigilancia. Habrá quien persiga la síntesis de organismos perjudiciales o quienes, aun obrando de buena fe, descuiden sus creaciones y pongan en grave riesgo nuestra salud o el entorno. Venter y su grupo tuvieron la precaución de incluir, a modo de "marcas de agua", minúsculas modificaciones genéticas en su creación. Técnicas de identificación semejantes deberían ser obligadas para cualquiera que recurra a la biología sintética. Sin duda, abordar tales problemas exigirá grandes esfuerzos.

Quizás haya quien piense que la creación de nuevos organismos amenaza la dignidad de la vida. No estoy de acuerdo. En el fondo, se trata de otro triunfo del saber humano. Sólo cuando hayamos entendido mejor su funcionamiento seremos plenamente conscientes del valor que damos a la vida.

ARTHUR CAPLAN es titular de la cátedra de bioética Emanuel y Robert Hart en la Universidad de Pennsylvania.

[TECNOLOGIA DE LA INFORMACION]

MEMORIAS SIN LIMITES

■ **EDWARD FELTEN**

Imagine llevar en el bolsillo toda la música jamás grabada por la humanidad. Algo así será posible hacia el término del presente decenio. Pocos años después podrá portar consigo todas las películas y programas de televisión. Hoy día ya resulta factible grabar en audio la vida entera de una persona, y dentro de algunos años podrá hacerse también en vídeo. Los dispositivos de memoria son tan densos y de tan bajo coste (discos duros y memorias *flash*) que, a casi todos los efectos, su capacidad de almacenamiento pronto se tornará infinita. Cuando eso ocurra, marcará el inicio de una nueva era.

Al tiempo que el coste de las memorias desciende de manera exponencial, se generaliza el empleo de dispositivos que, como los teléfonos móviles, facilitan la recogida de datos. Si añadimos los programas de indexación y un buen motor de búsqueda, obtendremos un archivo de todo lo que hayamos visto y realizado. Si a todo ello sumamos el análisis de datos, el resultado es una nueva manera de mirar a nuestras vidas.

Ello también transformará nuestro modo de pensar acerca de la información. En vez de decidir qué es lo que deseamos conservar, podremos guardarlo todo. Ya no habremos de esforzarnos en recordar el nombre de aquel restaurante en el que cenamos hace tres años: una simple consulta al archivo personal de vídeo nos informará en unos instantes. Algunos entusiastas de la tecnología ya registran todos los detalles de su vida cotidiana y emplean el análisis informático para mejorar su dieta, vigilar su actividad física o conocer los factores que afectan su ánimo.

Un almacenamiento de memoria sin límites habrá de enfrentarse con nuestro concepto de privacidad: será inevitable que aparezcamos en registros ajenos. Desaciertos y apuros quedarán al descubierto a menos que se adopten medidas para eliminarlos. Muy pronto, necesitaremos un nuevo consenso, y tal vez normas nuevas, para controlar el almacenamiento y uso de la información.

EDWARD FELTEN es director del Centro Normativo para Tecnología de la Información en la Universidad de Princeton.



[NEUROCIENCIA]

EL MISTERIO DE LA CONSCIENCIA

■ **CHRISTOF KOCH**

La relación entre la mente y el cuerpo ha venido desafiando a los más eminentes pensadores de la humanidad desde los tiempos de Platón y Aristóteles. ¿Cómo puede de un pedazo de materia alojado en el cráneo emerger algo como la consciencia? ¿Requiere el proceso la intervención de algo sin realidad física, de un alma inmaterial? ¿Es posible crear un *gólem* y dotarle de sentimientos? A falta de hechos, durante siglos los eruditos no han logrado ir más allá de la especulación. Pero esa época pertenece al pasado: la ciencia de hoy ha comenzado a explorar los fundamentos materiales de la mente consciente. En los próximos años, la neurociencia aportará detalles que articularán el debate filosófico acerca de la consciencia.

Diferentes vías de investigación ya han obtenido resultados relevantes. Las imágenes por resonancia magnética funcional y los electroencefalogramas permiten determinar la actividad mental o los sentimientos en un paciente que, afectado por una lesión cerebral, se encuentra despierto pero no responde a ningún estímulo. Ya se están identificando las conexiones neuronales específicas en las que se basa el reconocimiento consciente de los estímulos sensoriales. Y hoy en día contamos con técnicas tan sorprendentes como la optogenética: se insertan en el cerebro de un animal genes que codifican proteínas sensibles a la luz; después, mediante destellos luminosos, se activan o desactivan las células nerviosas, ya sea con el fin de escudriñar el funcionamiento del cerebro o de manipularlo. La neurociencia pasa así de la mera observación a la posibilidad de intervenir en las conexiones cerebrales.

Fruto de tales investigaciones son las nuevas teorías sobre la consciencia, basadas en las ciencias de la información y en ideas matemáticas. Su objeto consiste en describir las características que ha de poseer un sistema físico (como una red de neuronas) para ser considerado consciente. Además, aspiran a responder en términos cuantitativos a preguntas que desde hace tiempo nos obsesionan: ¿Se da cuenta un paciente crítico de la gravedad de su estado? ¿Cuándo adquiere consciencia un recién nacido? ¿Es consciente un feto? ¿Tiene un perro consciencia de sí mismo como ser pensante? ¿Qué ocurrirá con Internet y sus miles de millones de ordenadores interconectados? Pronto contaremos con respuestas a éstas y otras cuestiones. Y eso supondrá un gran paso adelante.

CHRISTOF KOCH es profesor de biología cognitiva y conductista en el Instituto de Tecnología de California.

[ENERGIA]

EL FIN DEL PETROLEO

■ **MICHAEL WEBBER Y DANIEL KAMMEN**

Aunque el petróleo ha sido el principal sostén de nuestro transporte durante más de un siglo, su dominio bien podría estar tocando a su fin como consecuencia de varios factores: los nuevos yacimientos se ubican en lugares cada vez menos accesibles, las normativas ambientales son cada vez más rígidas y los automóviles de propulsión eléctrica o de gas natural están llegando al mercado. El Congreso de EE.UU. ha dispuesto que, a partir de 2022, una quinta parte del combustible líquido utilizado en el transporte proceda de biocombustibles. Todo ello parece indicar que el consumo de gasolina muy pronto alcanzará su pico histórico —si es que no lo ha alcanzado ya—. Cuando eso ocurra, disminuirá la demanda del crudo dulce ligero.

La transición hacia otros tipos de combustibles aún ha de llegar. Pero la manera en que dicha transición afectará a nuestra economía y al entorno dependerá de las decisiones que tomemos hoy. Nadie nos asegura que los combustibles alternativos vayan a ser más limpios que la gasolina: existen numerosas opciones baratas que no lo son. Un reemplazo por parte de combustibles sólidos (como pizarras bituminosas o arenas de alquitrán) o líquidos derivados del carbón agravaría el deterioro ambiental. Sin duda, la tentación de utilizar esos combustibles sólidos crecerá, puesto que sus reservas abundan en comparación con las de crudo dulce ligero y, además, las técnicas para su conversión a estado líquido se tornan cada vez más económicas.

El problema radica en que obtener un barril de combustible líquido a partir de tales fuentes consume más energía que refinar un barril de crudo dulce ligero. Eso implica que las emisiones de carbono por unidad de energía producida aumentarán, a menos que establezcamos sistemas de captura de carbono a gran escala. Además, las técnicas de minería y producción de tales combustibles, muy diferentes de las del petróleo, podrían afectar a numerosas zonas tanto terrestres como marítimas.

Cabe imaginar un horizonte más optimista en el que la electricidad, el gas natural, los biocombustibles de segunda generación y otras fuentes de energía más limpias, así como un mayor ahorro de combustible, socaven poco a poco el valor estratégico del crudo dulce ligero. Pero, para lograrlo, habremos de gestionar la transición de la manera apropiada. Sólo una política energética adecuada nos ayudará a conseguir un sistema de energía más limpio, seguro, flexible y barato.

Si conseguimos llevar a la práctica tales medidas, algún día, desde sus limpios vehículos de repostaje doméstico, nuestros nietos se burlarán de las antiguas luchas entre países por las inútiles reservas de petróleo.

MICHAEL WEBBER es director agregado del Centro de Energía Internacional y Política Ambiental en la Universidad de Texas, Austin. DANIEL KAMMEN es director fundador del Laboratorio de Energías Renovables y Apropiadas en la Universidad de California, Berkeley.

[BIOCOMBUSTIBLES]

A FAVOR DE UNA ENERGIA MAS SANA

■ **R. JAMES WOOLSEY**

Quizá se acabe la era del petróleo. Pero, al ritmo actual, su final será lento. Mientras tanto, su consumo continuará destruyendo el entorno y creando enormes problemas estratégicos y económicos. Son varias las medidas con las que EE.UU. podría acelerar y hacer menos dolorosa esa transición: mejorar el rendimiento de los motores de combustión interna, fomentar los vehículos eléctricos y de gas natural, abrir el mercado a los biocombustibles actuales (etanol y metanol) y financiar la investigación para obtener nuevos biocombustibles a partir de residuos o algas.

Sin embargo, medidas tan audaces requieren una voluntad política que no parece que podamos esperar de Washington. La situación cambiaría si nuestros líderes también hiciesen notar los beneficios sanitarios derivados del abandono del petróleo, como un descenso del cáncer y de la obesidad, entre otras patologías.

El perjuicio que el petróleo inflige a la salud pública adopta formas diversas. Según C. Boyden Gray, antiguo enviado de EE.UU. para la energía en Eurasia, y Andrew Varcoe, jurista, la laxa aplicación del Decreto de Limpieza del Aire (*Clean Air Act*) permite que las compañías petrolíferas recurran a cancerígenos como el benceno, el tolueno o el xileno para aumentar el octanaje de la gasolina. Concluyen que, sólo en los EE.UU., los costes sanitarios derivados de esta práctica ascienden a 100.000 millones de dólares anuales.

El empleo de biocombustibles mejoraría nuestra salud. Sus críticos alegan con frecuencia que la producción de biocombustibles merma la tierra disponible para el cultivo de alimentos. Pero el 95 por ciento del maíz cultivado para consumo no se destina a las personas, sino al ganado: los piensos de almidón de maíz tornan más grasa su carne y, supuestamente, mejoran su sabor. No obstante, la ingesta de grasas aumenta de manera considerable los niveles de colesterol de nuestro organismo.

Pero, además, el almidón de maíz no constituye un alimento natural para el ganado, sino que provoca trastornos digestivos causantes de múltiples enfermedades. Ello exige la administración de grandes cantidades de antibióticos, una práctica que favorece la aparición de bacterias resistentes a los fármacos. Sin embargo, podríamos evitar esos efectos negativos para la salud si produjésemos biocombustibles a partir del almidón de maíz y empleásemos la proteína del cereal para alimentar el ganado.

Por otra parte, inundar el mercado alimentario con almidón de maíz, en vez de utilizarlo para producir biocombustibles, abarata la fructosa. Ello reduce el coste de la comida basura, responsable de la obesidad, sobre todo en la infancia.

El petróleo no sólo crea problemas estratégicos y ambientales. También aumenta el riesgo de cáncer y contribuye a fomentar la obstrucción arterial, las enfermedades infecciosas y la diabetes infantil. ¿Qué más le podemos pedir?

R. JAMES WOOLSEY preside Woolsey Partners y ha sido director de la CIA.

[EVOLUCION]

NUEVA VENTANA AL ORIGEN DEL HOMBRE

■ **LESLIE AIELLO**

Para estudiar la evolución humana, los expertos se han apoyado siempre en los fósiles y reliquias culturales de nuestros antepasados, y en la biología y la conducta de los humanos y simios vivientes. Sin embargo, la reciente secuenciación del genoma del neandertal, nuestro pariente más próximo, abre una ventana de extraordinaria importancia a nuestra prehistoria colectiva.

Ahora podremos ir más allá de las manifestaciones físicas de cambios evolutivos que ya nos habían dado a conocer huesos y piedras. Gracias a ambos genomas, disponemos de la auténtica información hereditaria que codifica los rasgos de cada especie. Aprenderemos, desde un punto de vista genético, qué nos distingue de los demás seres vivos y cuándo y de qué manera surgieron esas diferencias. Obtendremos un relato de la evolución de nuestra especie mucho más detallado de lo que, hace tan sólo unos años, la mayoría de los paleoantropólogos se hubiese atrevido a soñar.

Al comparar la secuencia del neandertal con la nuestra, el equipo de Svante Pääbo, del Instituto Max Planck de Antropología Evolutiva de Leipzig, identificó 200 regiones del genoma humano moderno que, desde que los dos grupos de homínidos se separaron, habían sufrido evolución adaptativa. Esos segmentos de ADN (los cuales incluyen genes relativos al metabolismo, el desarrollo cognitivo y el esqueleto) encierran la clave del carácter único de nuestra especie. Todavía no se conoce cómo han repercutido los cambios recientes en el funcionamiento de esas regiones del genoma, pero averiguarlo no es más que cuestión de tiempo.

Mi área de investigación (termorregulación y metabolismo) se halla entre las muchas que se beneficiarán de esos nuevos datos. Los neandertales soportaron los rigores de una Europa cubierta de hielo, por lo que una cuestión abierta es si su adaptación fisiológica les permitió sobrevivir sin prendas especiales de abrigo. En cuanto se logre clasificar la genética de la termorregulación, podremos confirmar si hubo tales adaptaciones. Numerosos antropólogos sostienen que los humanos modernos nos impusimos a los neandertales gracias, en parte, a que nuestro organismo aprovechaba mejor el aporte calórico de los alimentos (una ventaja crucial cuando los recursos escasean). El genoma del neandertal también ofrece la posibilidad de contrastar esa hipótesis. Además, nos ayudará a entender por qué los humanos actuales contamos con esqueletos más ligeros, y por qué nuestros respectivos cráneos exhibían formas tan diferentes. Asimismo, aclarará si nuestras capacidades cognitivas superan o no a las que poseían nuestros "parientes de cerebro voluminoso".

El estudio del genoma de otras especies extintas nos aportaría aún más información. En estos momentos, el equipo de Pääbo se encuentra secuenciando el ADN extraído de una falange de entre 30.000 y 50.000 años de antigüedad hallada en la cueva Denisova del macizo de Altai (Siberia). Tal vez pertenezca a una especie nueva. Su hallazgo apunta a que el número de migraciones primitivas desde Africa hacia Europa quizá fuese mayor de lo que pensábamos. En todo caso, a medida que aumenten los esfuerzos para secuenciar y analizar el ADN de nuestros antepasados, la paleogenética continuará perfilando los detalles de la odisea del hombre a través del tiempo.

LESLIE AIELLO es presidente de la Fundación Wenner-Gren para la Investigación Antropológica de Nueva York.

[GENETICA]

MEDICINA PERSONALIZADA

■ **GEORGE CHURCH**

El coste del Proyecto Genoma Humano, concluido en 2003, ascendió a 3000 millones de dólares. Hoy en día, secuenciar un genoma humano resulta un millón de veces más barato. El acceso a las técnicas de manipulación e ingeniería genética se ha popularizado. La biología acaba de entrar en una fase de actividad frenética que recuerda al comienzo de los años ochenta, cuando los apasionados de la informática se afanaban en sus garajes para acercarnos a la era de los ordenadores personales.

Al tiempo que la biotecnología se democratiza, la "medicina de talla única" de la que nos hemos servido durante los últimos cien años deja paso a una terapéutica adaptada a cada individuo. En un futuro próximo los médicos prescribirán programas de prevención personalizados. Formularán diagnósticos integrales ajustados al paciente en lo que respecta a sus genes, bacterias, alérgenos, hongos, virus y sistema inmunitario. Del mismo modo que ya existen aldeas remotas que se benefician de Internet, las mismas también dispondrán de una asistencia médica adecuada a sus costumbres, geografía y habitantes. El estudio de combinaciones específicas de genes y factores ambientales permitirá introducir cambios en la dieta, los fármacos y el comportamiento para que vivamos mejor durante más tiempo.

Dentro de poco, un complejo ecosistema de atención sanitaria y suministro informático permitirá un tratamiento completamente individual. Las células madre podrán ser acomodadas a terapias específicas. Nuestro genoma será secuenciado todos los años para detectar la aparición de células cancerosas, células autoinmunes o inflamaciones, lo que permitirá diseñar el tratamiento más eficaz para cada enfermedad. No sólo conocer, sino remodelar nuestra propia biología formará parte del quehacer vital.

GEORGE CHURCH es director del Centro de Genética Computacional de la facultad de medicina de Harvard.



[AGRICULTURA]

LA FUTURA REVOLUCION AGRARIA

■ **JOHN REGANOLD**

A pesar de que se estima que hacia 2050 la población mundial habrá alcanzado los nueve mil millones de personas, algunos expertos aseguran que los sistemas de explotación al uso bastarán para alimentar a todo el planeta. Pero continuar por semejante camino ocasionaría daños irreversibles al entorno. Existen, por fortuna, otras alternativas. Si pasamos de una explotación intensiva en recursos a otra intensiva en conocimientos, acabaremos con una explotación agropecuaria insostenible y produciremos, en un entorno saludable, alimentos de calidad para todo el mundo.

La agricultura tradicional erosiona y degrada el suelo. Los fertilizantes artificiales requieren mucha energía para su producción y, a menudo, contaminan ríos, lagos y mares. A ello hay que añadir los riesgos que comporta para la salud de los trabajadores el uso de pesticidas. Las técnicas de explotación orgánica (ya sea en granjas acreditadas o integradas en los métodos tradicionales) permiten suprimir o limitar el uso de compuestos químicos. La alternancia de cereal y legumbre, por ejemplo, ayuda a recuperar el nitrógeno del suelo y reduce así la necesidad de fertilizantes. Lo mismo sucede al añadir a la rotación un tercer o cuarto cultivo (quedan más residuos vegetales en el suelo tras la cosecha) o al convertir el terreno en pastizales.

Para mantener el suelo en buen estado y reducir la erosión, en muchos casos se podría recurrir a la siembra directa: plantar sin labranza previa. Por último, urge despilfarrar menos: hoy en día desperdiciamos entre el 30 y el 40 por ciento de los alimentos disponibles, tanto en los países en desarrollo (donde se arruinan a su paso por carreteras deficientes o por falta de sistemas de almacenaje apropiados) como en los países más ricos (donde se desechan por ligeros defectos, olvidados o "caducados" aunque se encuentren en perfecto estado).

Las anteriores medidas permitirían que cada habitante del mundo dispusiese de una ración alimenticia sana de 2350 calorías diarias, tal y como recomienda la FAO. El logro de este objetivo exige concentrar la atención mundial en lo relativo a la alimentación y la ecología, además de fomentar la investigación. Y, por supuesto, la voluntad política resulta indispensable para acometer esta revolución agraria.

JOHN REGANOLD es profesor Regents de ciencia del suelo en la Universidad del Estado de Washington.

Sepias polarizantes

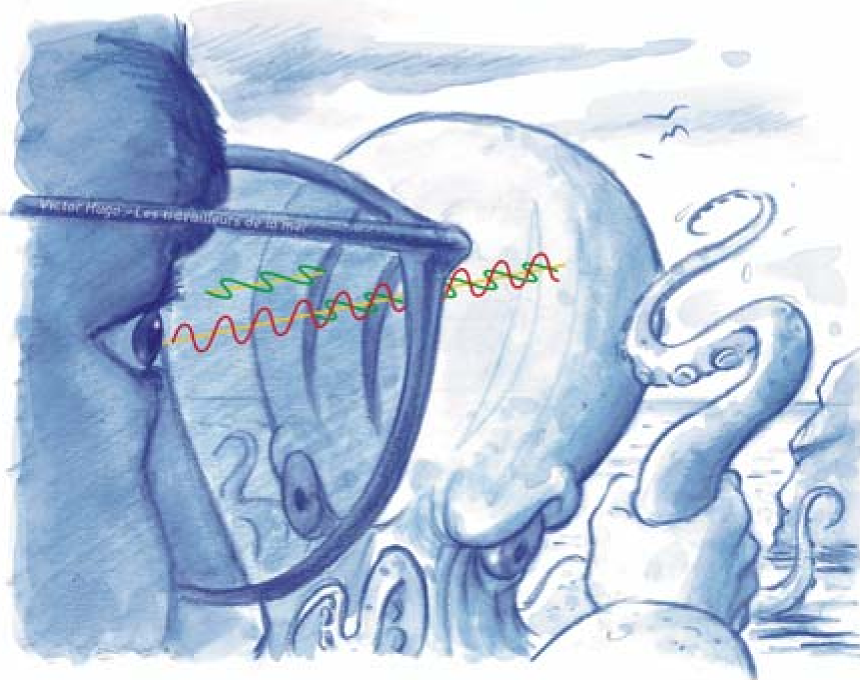
Numerosos animales distinguen la polarización de las ondas luminosas. Algunos cefalópodos llegan incluso a controlar la polarización de la luz que refleja su piel... ¿para comunicarse en secreto?

Jean-Michel Courty y Edouard Kierlik

La sepia *Sepia oficinalis* no distingue los colores y su cuerpo es de tinte uniforme. Así pues, a diferencia de otros animales, este molusco no emplea los colores para comunicarse. Sin embargo, *S. oficinalis* puede modificar el aspecto con el que se presenta ante sus congéneres sin que los humanos nos apercibamos de ello. Y no porque aproveche algún tipo de luz invisible para nosotros, sino porque regula a voluntad una propiedad de la luz a la que nuestros ojos son ciegos: la polarización.

Para el hombre, la luz tiene una intensidad y un color. Estas percepciones se corresponden con dos magnitudes físicas: la amplitud y la frecuencia de las vibraciones de la onda luminosa. Pero la luz posee más atributos. Una onda luminosa es la combinación de un campo eléctrico y uno magnético que oscilan en direcciones perpendiculares a aquella en la que se propaga la onda. Se llama polarización a la dirección en la que oscila el campo eléctrico.

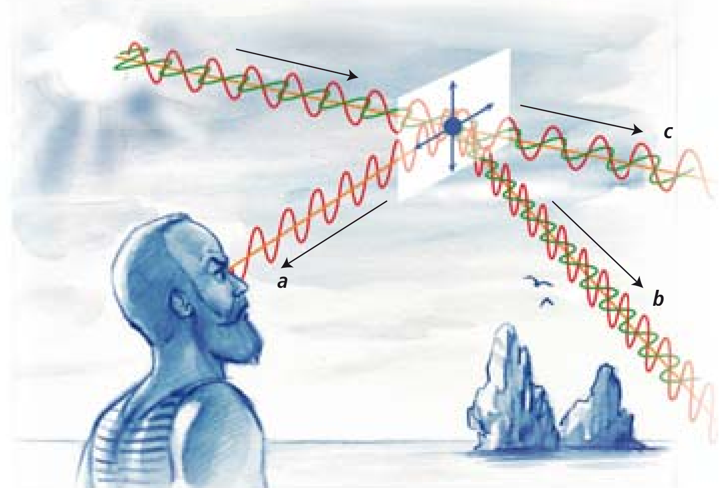
Una analogía mecánica vendría dada por las vibraciones de una cuerda, uno de cuyos extremos sacudimos con la mano. Los vaivenes de la mano se propagan a lo largo de la cuerda: cada pequeño segmento de la misma oscila en una dirección perpendicular a su extensión y reproduce con retardo los movimientos de la mano. Si éstos son de arriba abajo, la cuerda se deforma según la vertical; si agitamos la mano de derecha a izquierda, la cuerda vibra en la dirección horizontal. Ello permite transmitir una señal sin variar la amplitud ni la velocidad de las oscilaciones de la mano: basta con jugar con la dirección de las sacudidas. De igual modo, para comunicarse con una onda luminosa no es necesario modificar su intensidad ni su color. Se puede transmitir un mensaje si se controla la dirección de oscilación del campo eléctrico.



1. NUMEROSOS CEFALOPODOS, como la sepia, exhiben sobre su piel unos dibujos sólo visibles con ayuda de filtros polarizantes. Esos dibujos, que el animal puede modificar, constituirían un modo de comunicación oculto. Las zonas con dibujos reenvían luz polarizada, la cual el filtro polarizador de unas gafas detiene si se orienta de la manera correcta. Las otras zonas del cuerpo reenvían luz no polarizada, la cual atraviesa, en parte, el filtro.

Orientarse con la polarización

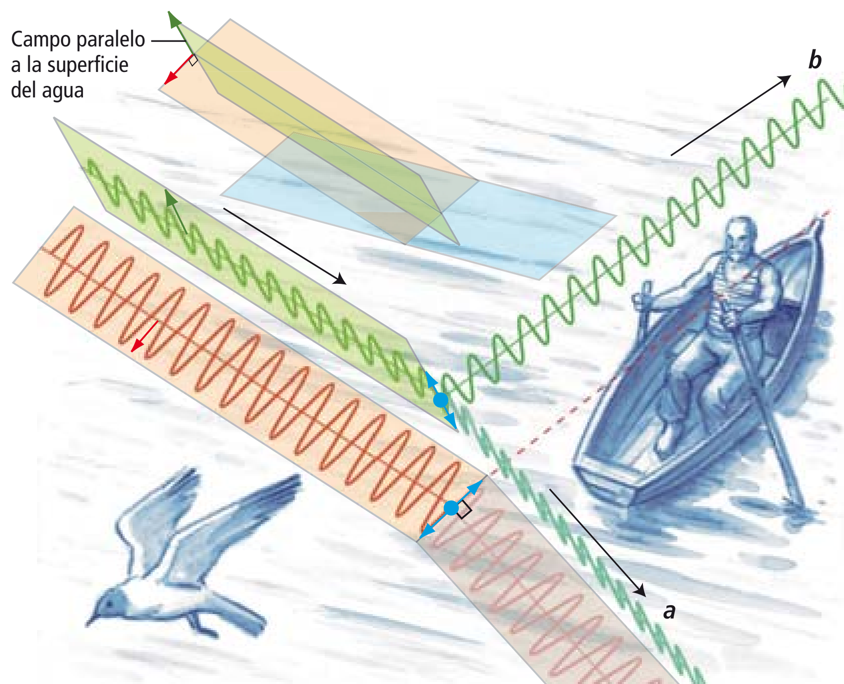
La polarización de la luz que nos llega del cielo permite a numerosos animales, como las abejas, orientarse con respecto



2. CUANDO LA LUZ NO POLARIZADA del Sol incide sobre una molécula de la atmósfera, las cargas de ésta vibran en la dirección perpendicular al rayo. Las ondas reemitidas en direcciones paralelas a dicho plano (*blanco*) se hallan polarizas tangencialmente al mismo (*a*). Para las ondas emitidas en otras direcciones el grado de polarización es menor (*b*), e incluso nulo (*c*). La polarización permite así referenciar las direcciones con respecto al Sol.

BRUNO VACARO

3. UNA ONDA (*verde*) polarizada en una dirección paralela a la superficie del agua provoca que sus moléculas vibren (*flechas azules*) en la dirección del campo eléctrico. Así se genera una onda refractada (*a*) y una reflejada (*b*). Pero cuando la onda incidente se halla polarizada según un plano vertical (*rojo*), la onda reflejada es menos intensa que en el caso anterior, e incluso se anula para el ángulo indicado aquí. Ya que el fenómeno atenúa una dirección de polarización y preserva la otra, la reflexión en el agua polariza la luz natural.



BRUNO VACARO

al Sol incluso en un día nublado. ¿Cómo? Gracias a que la polarización de la luz dispersada por el cielo depende de la dirección de observación.

Una onda luminosa se genera a partir del movimiento acelerado de una carga eléctrica. Así pues, las cargas eléctricas que componen la materia se comportan, cuando vibran, a modo de diminutas antenas que emiten ondas electromagnéticas. Las oscilaciones del campo eléctrico de cada una de esas ondas son análogas a las vibraciones de la cuerda que mencionábamos arriba: en particular, su dirección de oscilación sigue la del movimiento de la carga eléctrica emisora.

¿Qué ocurre con la luz emitida por el Sol? En el astro, el movimiento de las cargas eléctricas se debe a la agitación térmica, por lo que es desordenado. En consecuencia, una onda luminosa emitida por el Sol no se encuentra polarizada: la dirección de su campo eléctrico cambia de modo aleatorio.

Al incidir sobre una molécula de la atmósfera, la luz solar hace vibrar las cargas eléctricas de la molécula en la misma dirección en la que oscila su campo eléctrico —aquí conviene recordar que dicho campo eléctrico es, aunque aleatorio, siempre perpendicular al rayo incidente—. Esas cargas en vibración generan, a su vez, ondas electromagnéticas que se propagan en todas las direcciones del espacio: se dice que la molécula reemite, o dispersa, la luz incidente. Dado que el campo eléctrico de la luz dispersada ha de ser perpendicular a la dirección en que ésta se propaga, pero también paralelo a la vibración de la carga eléctrica, la luz reemitida en las direcciones perpendiculares a la onda incidente se encuentra polarizada (*véase la figura 2*).

En el caso de las ondas emitidas en otra dirección, el grado de polarización es sólo parcial, y tiende a anularse conforme la dirección de la onda dispersada se aproxima a la del rayo solar. Así, si medimos la polarización de la luz que nos llega del cielo desde varias direcciones, averiguaremos la posición del Sol.

Polarización debida al reflejo

Al igual que la dispersión, también la reflexión polariza la luz. Los mecanismos subyacentes son los mismos. La luz que reflejan gran número de superficies se halla por tanto parcialmente polarizada, y la dirección de vibración del campo eléctrico reflejado es, con preferencia, paralela a la superficie reflectante (*véase la figura 3*). Para la luz reflejada en el agua, la polarización será horizontal, mientras que será vertical en el caso de una ventana. Gracias a este fenómeno, las sepias polarizan la luz que reenvían y modifican así su aspecto. Ciertas células de su piel contienen unas plaquetas que polarizan la luz por reflexión. Mediante control nervioso, esas células pasan de un estado en el que las plaquetas se hallan desordenadas (reflejan una luz no polarizada) a un estado ordenado que polariza la luz.

Ahora bien, las moléculas responsables de la visión de la sepia son similares a las nuestras. ¿Por qué, entonces, distinguen sus ojos la polarización? Dichas moléculas poseen una estructura lineal. Sus cargas eléctricas, limitadas a moverse a lo largo del eje de la molécula, sólo pueden ser puestas en movimiento por un campo eléctrico paralelo a dicho eje; es decir, por una luz polarizada en la dirección paralela a la molécula. En nuestro ojo, las moléculas se hallan orientadas al azar. En la sepia exhiben una orientación común; de ahí la sensibilidad de sus células visuales a la polarización.

Además de poder comunicarse en secreto, la sensibilidad de las sepias a la polarización les permite descubrir con facilidad presas casi transparentes. La luz transmitida por el agua se halla también parcialmente polarizada, mientras que la luz que difunde la presa, aunque débil, no lo está. Esa diferencia aumenta el contraste y hace más visible a la presa si el depredador percibe la polarización.

Y nosotros, ¿debemos renunciar a verla? No: podemos hacerlo si empleamos gafas con filtros polarizantes sintéticos. Esos filtros, compuestos de moléculas alargadas y orientadas en una misma dirección, se comportan como hilos eléctricos paralelos que sólo dejan pasar la luz polarizada en una dirección: cuando la polarización de la luz es paralela a la de las moléculas, el campo eléctrico induce una corriente y el filtro se comporta como un conductor, que refleja la luz. Pero si el campo eléctrico es perpendicular a la alineación de las moléculas, no aparece corriente alguna y la luz lo atraviesa. Las gafas polarizantes eliminan la luz polarizada en la dirección horizontal y, por tanto, gran parte de los reflejos molestos, ya que muchos provienen de superficies horizontales: tales gafas permiten que los reflejos de la luz solar sobre la superficie del mar no deslumbren a los marineros; para los automovilistas, atenúan las reflexiones en los capós de los demás vehículos.

E pluribus unum

Cómo razonar colectivamente a partir de juicios individuales

Gabriel Uzquiano

Existen muchas clases de colectividades. Hay conjuntos desorganizados de individuos a los que no une ningún ánimo específico, como un grupo de personas que espera un autobús o el conjunto de quienes comparten el mismo código postal. Pero hay también conjuntos organizados de individuos unidos por una serie de objetivos comunes que regulan la interacción entre sus miembros. Ejemplos de los mismos serían el Tribunal Constitucional, partidos políticos, sindicatos, familias o incluso un grupo de amigos que planea un viaje. Para lograr sus objetivos, tales colectividades deben razonar a partir de los juicios individuales de sus miembros, los cuales puede que no siempre coincidan con la postura colectiva. El problema que quisiera discutir hoy es el de cómo derivar los *juicios* de una colectividad a partir de los juicios individuales de sus miembros.

Veamos un ejemplo para motivar el problema. Tras meses de negociaciones, los empleados *A*, *B* y *C* deben decidir si aceptan o no la última oferta de la patronal. Los tres coinciden en que deben abandonar las negociaciones si, y sólo si, la oferta no incluye una reducción adecuada de la jornada laboral o no incluye un aumento salarial significativo. Pero *A*, *B* y *C* difieren en su valoración de los términos de la oferta. Supongamos que sus juicios se distribuyen como indica la tabla 1.

¿Cómo deberían responder a la oferta de la patronal? Por un lado, podríamos pensar que deberían abandonar las negociaciones, ya que tanto *A* como *B* opinan que la propuesta de la patronal es inaceptable y sólo *C* desea continuar negociando.

Pero los trabajadores podrían ser acusados de incoherencia si abandonan el diálogo con la patronal. Esta podría hacer notar que la mayoría de los empleados considera adecuada la reducción de jornada y que, además, también la mayoría de los empleados encuentra significativo el aumento salarial. Por tanto, si razonamos a partir de las premisas de la mayoría, la colectividad formada por *A*, *B* y *C* debería concluir que la oferta es aceptable.

Buscar una postura coherente

¿Cómo responder a la acusación de incoherencia? Una primera opción consistiría en volver a deliberar hasta que alguien cambiara de opinión. Si, por ejemplo, *C* se convenciera de que la reducción de jornada es insuficiente, los trabajadores podrían abandonar las negociaciones sin ningún cargo de conciencia. Su postura sería coherente, ya que no sólo creen que la reducción de jornada propuesta no basta, sino que, además, consideran que una reducción adecuada constituye una condición imprescindible para aceptar la oferta. Sin embargo, aunque tal solución parece atractiva, no siempre podemos confiar en la flexibilidad de los miembros de una colectivo.

Una segunda posibilidad sería autorizar a un portavoz para que decida en nombre de los empleados. Si *A* fuese el portavoz, la postura colectiva coincidiría con la suya y los trabajadores abandonarían las negociaciones. Dado que *A* actúa con coherencia, no hay riesgo de que este método implique una postura colectiva incoherente. Pero ahora el problema es otro: el método no otorga el mismo peso a todos los individuos.

	¿Reducción adecuada de la jornada laboral?	¿Aumento salarial significativo?	¿Abandono de las negociaciones?
A	Sí	No	Sí
B	No	Sí	Sí
C	Sí	Sí	No

1. ¿Qué decisión debería tomar el colectivo de trabajadores formado por *A*, *B* y *C* si sus opiniones individuales se corresponden con las que muestra la tabla?

Una tercera opción consistiría en, antes de emitir un juicio colectivo acerca de una proposición, tener en cuenta el papel que esa proposición juega en las deliberaciones. Mientras que algunas proposiciones figurarán como premisas, una de ellas constituirá la conclusión. ¿No deberíamos, quizás, emplear un procedimiento diferente en cada caso?

Existen al menos dos maneras de implementar esta posibilidad. Una de ellas concede preferencia a las premisas. La otra prioriza la conclusión.

Por ejemplo, podríamos decidir por mayoría simple los juicios colectivos con respecto a las premisas, pero no así con respecto a la conclusión. En el caso que nos ocupa, este método atribuiría al conjunto de los trabajadores los juicios de que la reducción de jornada es adecuada y que el aumento salarial es suficiente. También concluiríamos, en virtud del mismo método, que la colectividad cree que las proposiciones anteriores implican no abandonar las negociaciones. Sin embargo, nos abstendremos de utilizar el método de mayoría simple para derivar el juicio colectivo con respecto a la conclusión. Así pues, a partir de las premisas aceptadas por la colectividad, vemos que, con independencia de sus conclusiones individuales, *A*, *B* y *C* creen que deben continuar negociando. El riesgo de esta estrategia consiste en la alienación de los miembros del colectivo, ya que la mayoría de los empleados siguen insatisfechos con la oferta que el colectivo ve satisfactoria.

Otra posibilidad consiste en emplear el procedimiento de mayoría simple para derivar el juicio colectivo con respecto a la conclusión, pero no con respecto a todas las premisas. En tal caso, dado que la mayoría opina que se deben abandonar las negociaciones, éste será el juicio que atribuiremos a la colectividad. ¿Qué decir acerca de su actitud con respecto a las premisas? No mucho, a menos que fijemos el juicio colectivo con respecto a alguna de ellas. Por ejemplo, podemos utilizar el procedimiento de mayoría simple para la proposición que establece que de-

¿Quiere saber más?

El teorema de Arrow, relacionado con el de List y Pettit, fue presentado por Agustín Rayo en "Preferencias colectivas", INVESTIGACIÓN Y CIENCIA; agosto de 2010.

Christian List, uno de los autores del teorema, mantiene una página dedicada al problema que hemos discutido en: **http://personal.lse.ac.uk/list/doctrinalparadox.htm**

berían abandonarse las negociaciones si, y sólo si, ni la reducción de jornada ni el aumento salarial resultan satisfactorios. Si les atribuimos, además, el juicio colectivo de que la oferta incluye una reducción aceptable de la jornada laboral, entonces deberíamos deducir (de nuevo, con independencia de lo que opinen *A*, *B* y *C* a modo individual) que la colectividad considera insuficiente el aumento salarial. El problema aquí radica en que no parece haber un modo sistemático para decidir qué premisas merecen un tratamiento especial y qué premisas no.

Dado que ninguna de las opciones anteriores parece completamente satisfactoria frente a la acusación de incoherencia, tal vez deberíamos plantearnos un movimiento desesperado: abandonar por completo el ideal de coherencia. Al fin y al cabo, no resulta obvio que nuestras opiniones individuales hayan de ser coherentes. Esta es, al menos, la interpretación que algunos han dado a paradojas como *la paradoja del prólogo:*

Imaginemos al autor de una gran obra enciclopédica quien, en el prólogo, admite que, dada la extensión de la obra, la misma debe sin duda contener errores. Sin embargo, ello no impedirá que el autor continúe convencido de la corrección de cada una de las afirmaciones que ha recopilado, puesto que ha invertido un cuidado exquisito en su elaboración. Muchos concluirían que el autor posee un cuerpo de creencias incoherente: cree en todas y cada una de las afirmaciones que ha incluido en la obra pero, al mismo tiempo, también cree que alguna debe ser errónea. Si las creencias de los propios individuos no siempre logran ser coherentes entre sí, ¿por qué insistir en el ideal de coherencia cuando se trata de una colectividad?

Me temo que no se trata de una opción muy atractiva. Supongamos, adaptando un ejemplo de Philip Pettit, filósofo y politólogo de la Universidad de Princeton, que un partido político adopta como suyos los juicios de la mayoría de sus miembros. En cierto momento el partido anuncia que, si forma gobierno, reducirá los impuestos de manera drástica. Como la mayoría de los miembros del partido son individuos razonables, admiten que una reducción de impuestos sólo es factible si viene acompañada por una reducción del gasto en alguna partida. Unos meses más tarde, el mismo partido declara, tras haber aplicado un método de mayoría simple, que en caso de formar gobierno aumentará el gasto en defensa. Hasta aquí no hay todavía inconsistencia alguna. Sin embargo, ya en vísperas de las elecciones, el partido debe decidir si aumentará también el gasto destinado al resto de las partidas. El problema consiste en que la distribución de votos entre sus miembros bien podría parecerse a la que muestra la tabla 2.

¿Votaría usted por semejante programa electoral? No parece que muchos lo hicieran. Un partido político debe aspirar a un ideal de coherencia si quiere mantener su credibilidad política.

El teorema de List y Pettit

¿Cómo derivar entonces los juicios de una colectividad a partir de los de sus miembros? Recientemente, Christian List, de la Escuela de Economía y Ciencia Política de Londres, y Philip Pettit han demostrado un teorema que sugiere que semejante pregunta carece de respuesta. En concreto, el teorema establece que no hay manera alguna de derivar los juicios de una colectividad a partir de los de sus miembros si, además, exigimos que se satisfagan las siguientes características:

1. *Dominio universal:* El método debe generar juicios colectivos para cualquier distribución de juicios individuales.
2. *Anonimidad:* El método no confiere un peso especial a los juicios de ningún miembro de la colectividad.
3. *Sistematicidad:* Los juicios colectivos con respecto a una proposición deben depender exclusivamente de la distribución de juicios individuales con respecto a la misma.
4. *Coherencia:* Los juicios colectivos deben ser coherentes entre sí.

Cada una de las opciones anteriores ha consistido en relajar alguna de las condiciones del teorema. Continuar con nuestras deliberaciones hasta dar con una distribución menos problemática supone renunciar a la primera condición. El nombramiento de un portavoz implica relajar la condición de anonimidad. Un tratamiento diferente a una proposición en función de su papel en las deliberaciones representa una violación de la condición de sistematicidad. Finalmente, el uso irrestricto del método de mayoría simple a fin de generar juicios colectivos equivale a renunciar a la condición de coherencia.

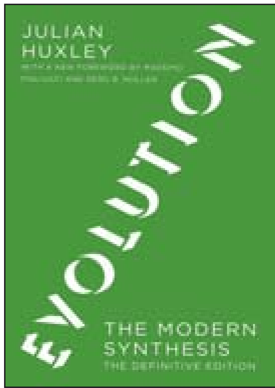
Así pues, el teorema demuestra que nos hallamos condenados a aceptar al menos una de las opciones discutidas con anterioridad. Aunque muchos filósofos y politólogos creen que la mejor solución consiste en relajar la condición de sistematicidad, en lo que no están de acuerdo es acerca de cómo implementar la propuesta. ¿Qué proposiciones priorizar? ¿Existen razones de principio para dar preferencia a las premisas de un razonamiento colectivo, o a la conclusión?

Parece, pues, que hay que tomarse en serio la figura de una colectividad como un sujeto intencional, a la que es posible atribuir juicios que no se hallan directamente determinados por los juicios individuales de sus miembros. Tal y como reza uno de los lemas nacionales de Estados Unidos, *E pluribus unum:* "De muchos, uno".

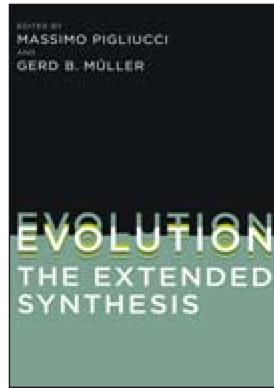
	¿Reducción de impuestos?	¿Aumento del gasto en defensa?	¿Aumento del gasto en el resto de las partidas?
A	Sí	Sí	No
B	Sí	No	Sí
C	No	Sí	Sí

2. Un partido político acuerda tomar sus decisiones mediante votaciones por mayoría simple entre todos sus militantes. ¿Votaría usted por el programa electoral que, empleando tal método, habría de adoptar el partido formado por *A*, *B* y *C*?

Gabriel Uzquiano es profesor de filosofía en la Universidad de Oxford.



EVOLUTION: THE MODERN SYNTHESIS. THE DEFINITIVE EDITION,
por Julian Huxley. Edición preparada por Massimo Pigliucci y Gerd B. Müller. The MIT Press; Cambridge, Mass. 2010.



EVOLUTION: THE EXTENDED SYNTHESIS.
Dirigido por Massimo Pigliucci y Gerd B. Müller. The MIT Press; Cambridge, Mass. 2010.

Síntesis Moderna

Agotado el modelo vigente en biología durante decenios, urge un nuevo marco teórico

Evolution: The Modern Synthesis es la obra clásica de Julian Huxley (1887-1975). Aparecida en 1942, recogía y compendiaba todo lo que se sabía entonces sobre biología evolutiva. Conceptos, tesis e hipótesis que se articulaban en torno a lo que él denominó la Síntesis Moderna. Massimo Pigliucci y Gerd B. Müller presentan ahora el texto completo de la edición de 1942, la introducción de Huxley a la edición de 1963 (segunda edición) y la introducción a la tercera edición, de 1974. Este último preámbulo fue firmado por nueve expertos procedentes de distintas áreas de la biología que ratificaban la plena vigencia del cuerpo estructural de la Síntesis Moderna.

Las ideas que vertebra Huxley en *Evolution* y conforman la Síntesis Moderna habían sido elaboradas por Ronald Fisher (*The General Theory of Natural Selection*, 1930), Theodosius Dobzhansky (*Genetics and the Origin of Species*, 1937), y Ernst Mayr (*Systematics and the Origin of Species*, 1942). En la misma onda constituyente se enmarcaron Georg Gaylord Simpson (*Tempo and Mode in Evolution*, 1944) y Ledyard Stebbins (*Variation and Evolution in Plants*, 1950). Realizaron también contribuciones fundamentales los genéticos de poblaciones J. B. S. Haldane ("The Time of Action of Genes, and its Bearing on Some Evolutionary Problems", *The American Scientist*, 1932), Sewall Wright ("The Roles of Mutation, Inbreeding, Crossbreeding, and Selection in Evolution", *Proceedings of the Sixth International Congress of Genetics*, 1932), y Bernhard Rensch (*Evolution above the Species Level*, 1959).

La síntesis consolidaba el darwinismo, cuya recuperación desde su eclipse a finales del siglo XIX había sido muy lenta. Entre los temas tratados por Huxley destacan los conceptos de especie y especiación. Estima que el curso de la evolución darwinista no está determinado sólo por la mutación, la selección natural y la historia de la especie, sino también por la naturaleza de los efectos del desarrollo de los genes y de los procesos ontogénicos en general. Resulta sorprendente cuán moderno se nos ofrece el pensamiento de Huxley ya a comienzos de los años cuarenta, tiempo en el que no se había descubierto todavía el papel del ADN y cuando el mendelismo buscaba asentarse.

Un grupo de biólogos de orientación matemática —los citados Fisher, Haldane y Wright— iniciaron una línea de trabajo que terminó demostrando que no había contradicción entre genética mendeliana y neodarwinismo (mutaciones y variación continua de los caracteres cuantitativos). Crearon la genética de poblaciones, considerada el espinazo matemático de la biología evolutiva y, por tanto, de la Síntesis Moderna. Mostraron que los procesos de selección, mutación, deriva y migración bastaban para dar cuenta de la microevolución. De abrir la genética de poblaciones a la historia natural, la sistemática, la paleontología, la zoología y la botánica se encargarían los mencionados Dobzhansky, Mayr, Simpson, Stebbins y Rensch.

Con los años, se fue pergeñando una gavilla de postulados básicos: la herencia se produce a través de la transmisión de genes de la línea germinal; la variación hereditaria es la consecuencia de combinaciones aleatorias de alelos preexistentes que son generados por los procesos sexuales, en tanto que las nuevas variaciones (mutaciones) resultan de cambios aleatorios del ADN; las variaciones heredables suelen tener efectos pequeños y la evolución es gradual; la unidad última de selección es el gen; las innovaciones morfológicas son resultado de las mutaciones génicas; que, si beneficiosas, se acumulan a lo largo del tiempo y conducen a una forma cualitativamente nueva; los objetos de selección son los individuos, entidades bien definidas, y la evolución, basada en una línea de descendencia vertical, acontece a través de modificaciones a partir de un precursor común.

En pleno éxito del modelo, aparecieron las primeras fisuras en el armazón: la herencia implica más que el ADN, pues existen variaciones heredables que son independientes de las variaciones en la secuencia de ADN; adquiere importancia capital la herencia blanda o herencia de variaciones inducidas y reguladas por el desarrollo; la frecuencia de aparición de las variaciones es a veces más alta en condiciones de estrés; el foco de la selección no es tanto el gen cuanto la red de interacciones del desarrollo; los mecanismos que generan plasticidad fenotípica han desarrollado un papel principal en la evolución; la selección de grupo, que implica selección de interacciones entre miembros de un grupo cooperantes, es un fenómeno común, y el patrón de divergencia que se conoce por patrón del "árbol de la vida", y que se suponía era universal, no acierta a explicar todas las fuentes de semejanzas y diferencias entre taxones.

En efecto, desde 1974, el campo de la biología evolutiva ha cosechado una avalancha de datos obtenidos con técnicas depuradas que ha instado una serie de innovaciones conceptuales más allá del marco de la Síntesis Moderna. Esa nueva realidad se aborda en *Evolution – the Extended Synthesis.* Por ejemplo, el problema de las adaptaciones de nivel superior. Entraron en escena en los años sesenta de la mano de John Maynard Smith y George C. Williams, quienes cuestionaban las declaraciones ingenuas sobre selección de grupo. En su *Adaptation and Natural Selection*, de 1966, Williams afirmaba que, aun cuando las adaptaciones de nivel de grupo podían evolucionar, no lo hacían en la práctica. Pero Williams no apoyaba su afirmación en pruebas empíricas, sino en argumentos teóricos y en el principio de parsimonia, que dicta que las explicaciones más sencillas (selección individual) deben preferirse a las explicaciones más complejas (selección de grupo).

Pero no bastaba con rechazar la selección de grupo. Había que ofrecer una explicación de las conductas altruistas y cooperadoras. Surgieron la teoría de la selección de parentesco (beneficiando los genes propios en organismo de otros), reciprocidad (beneficiando a los otros en espera de la devolución de beneficios) y teoría del gen egoísta (el gen constituido en unidad fundamental de selección para la evolución de todos los rasgos). Por ironía de las cosas, en esas tesis alternativas no dejaba de invocarse la selección de grupo. Al año de la impresión de *Adaptation and Natural Selection*, William D. Hamilton publicó "Extraordinary Sex Ratios", artículo hoy canónico. Aportaba ratios de sexo extremos con predominio de hembras en artrópodos. En su modelo matemático para explicar esas ratios sesgadas, Hamilton suponía que un gran número de grupos eran colonizados al azar por N individuos.

En un segundo ejemplo, Hamilton formuló la teoría de la eficacia biológica inclusiva (*inclusive fitness*), que Maynard Smith había denominado "selección de parentesco" en 1964. Lo veía como el efecto neto de un alelo altruista sobre todas las copias de sí mismo idénticas en la progenie. Como tercer ejemplo, la teoría de juegos se convirtió en un marco teórico arquetípico para el estudio de la evolución de la cooperación y altruismo en los años ochenta. El núcleo de los modelos de la teoría de juegos da por supuesto las interacciones entre pares, pero el planteamiento de dos personas fácilmente se generaliza a una teoría de juegos de n participantes, donde n remite a los grupos de individuos que interactúan y determinan la eficacia biológica de cada uno.

Tras el descubrimiento de Watson y Crick de la estructura helicoidal de la molécula de ADN, emergió el "dogma central" de la biología molecular, según el cual el flujo de información procedía siempre en un solo sentido: del ADN al ARN y de éste a las proteínas. Más tarde, se observó el flujo de ARN a ADN por el proceso de transcripción inversa. En un plano afín, los priones han revelado que algunas proteínas pueden catalizar cambios conformacionales en proteínas similares. Hay ejemplos de traducción directa de ADN en proteína en sistemas experimentales acelulares en presencia de ribosomas, pero no de ARNm. Todos esos procesos moleculares arruinan el dogma central de la biología molecular.

Las nuevas ideas rompen con tres restricciones básicas del modelo de la Síntesis Moderna: gradualismo, externalismo y gencentrismo. Contra el gradualismo labora el cambio repentino y drástico que apreciamos en los sistemas dinámicos complejos, los biológicos incluidos. Se conocen diversas clases de mecanismos para explicar el cambio discontinuo descrito en la evolución genómica, plasticidad fenotípica, desarrollo epigenético y herencia no genética.

¿Qué decir del externalismo? La concentración de la Síntesis Moderna en la selección natural concedió prioridad a todos los factores externos que posibilitaban la adaptación a través de una reproducción diferenciada. Estructura y función del organismo debíanse a una selección externa. Toda direccionalidad del cambio evolutivo resultaba de la selección natural. El advenimiento de la hipótesis Evo-Devo transgrede el externalismo al tomar en consideración los procesos generativos para justificar las formas de cambio. Desde esta perspectiva nueva, la selección natural constituye una condición de fondo, pero la especificidad de su producto fenotípico viene aportada por los sistemas de desarrollo que operan allí. En consecuencia, son los propios organismos los que representan los determinantes de variación e innovación seleccionable.

El gencentrismo pierde fuerza en una exposición científica que pivote sobre factores evolutivos multicausales, que abarcan componentes no programados del entorno, el desarrollo y la herencia. Lejos de negar la importancia de los genes en la evolución, se trata de asignarles un papel subsecuente. Se privilegia el establecimiento rutinario de interacciones en el proceso de desarrollo, la fiabilidad de su herencia y la fijación progresiva de los rasgos fenotípicos. De ese modo, la evolución progresa a través de la aprehensión de interacciones emergentes en circuitos genéticos y epigenéticos, que pasan a las generaciones siguientes, donde se elaboran.

En los modelos gencéntricos, el gen permanecía encerrado en una burbuja conceptual, herméticamente sellada, al abrigo de influencias del entorno, procesos reguladores, asociaciones de rasgos e interacciones con el resto del genoma. El tratar a los genes de forma aislada tenía sentido en un momento en que escaseaban los datos sobre las influencias externas. Pero el modelo burbuja presenta limitaciones reales: los organismos viven en entornos que cambian en el espacio y el tiempo. En el extremo inferior de la escala tenemos las mutaciones; en el extremo superior, los genomas. En la zona intermedia distinguimos otras escalas de organización genética. Así, haplotipos y particiones genéticas (exones, intrones, regiones 5' y 3' sin traducir y regiones reguladoras) residen entre mutaciones puntuales y genes, mientras que redes de genes y cromosomas ocupan un lugar entre genes y genomas.

Desde la óptica de la genómica, la ampliación de la Síntesis Moderna se sustancia en la puesta al día de los modelos operativos de información genética. Los avances registrados han dejado obsoletos los modelos de gen en genética de poblaciones, evolución molecular o genética evolutiva, aunque por motivos diferentes. En 1977 se secuenció el primer genoma; pertenecía a la especie vírica ϕX174, de sólo 5,4 kilobases. Hubo que esperar dieciocho años más, en 1995, para que se anunciara el de un organismo vivo, el genoma bacteriano de *Haemophilus influenzae*, de 1,8 Mb. En 2001 cayó otra barrera con la secuenciación del genoma humano, de tres gigabases. La interpretación del genoma como unidad estable

dejó paso a una visión de los genomas como estructuras maleables que evolucionaban con rapidez, compuestas de entidades diversas que colonizaban el entorno único del ecosistema genómico.

En ese dinamismo genómico, los elementos transponibles desempañarían un papel crucial. Los primeros transposones caracterizados fueron los elementos Tn en bacterias, elementos P en *Drosophila* y el sistema Ac/Ds del maíz. Los transposones de ADN operan por excisión e inserción en diversos lugares del genoma. Los retrotransposones se propagan mediante la creación de copias de ARN de sí mismos, que se transcriben de manera inversa y se insieren en otros lugares del genoma. Los transposones comprenden hasta el 44 por ciento del genoma humano.

Se descubrió que la transferencia génica lateral constituía un fenómeno ubicuo entre el genoma nuclear y el de los orgánulos (mitocondrias y cloroplastos). Y se conoció la extensa difusión de la transferencia de segmentos genómicos entre especies. El genoma dibujaba un mosaico evolutivo, cuyas piezas, procedentes de taxones diversos, se fueron ensamblando en el transcurso de la historia de la vida.

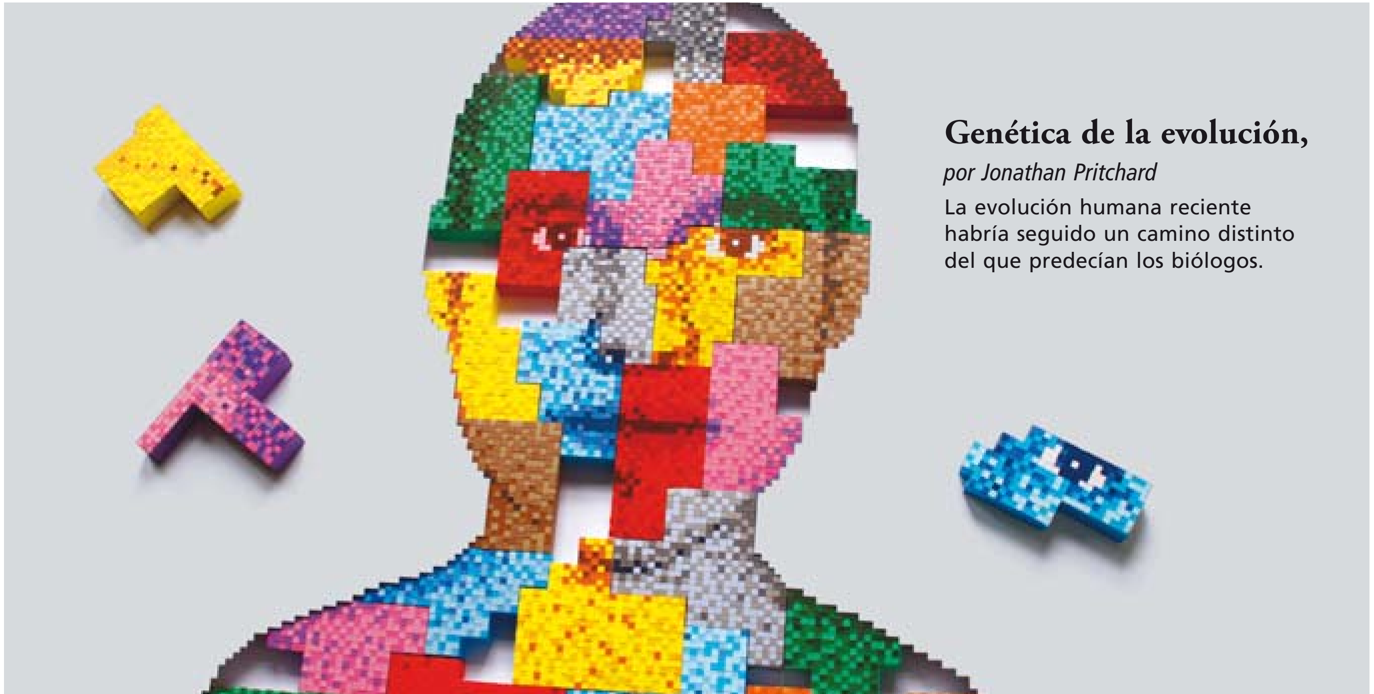
Si, por un lado, la Síntesis Moderna se hallaba incapacitada para reconocer la *construcción del nicho* como proceso co-causal de la evolución, por otro, la investigación evidenciaba la producción de variación por parte de las células y de los organismos en respuesta al entorno y al cambio genético. Los descubrimientos registrados desde los años setenta aportaron una nueva visión revolucionaria de la variación fenotípica (teoría de la variación facilitada), que cuestionaba la vieja idea de que la selección natural fuera la única fuerza creadora en evolución.

Acostumbramos pensar en la teoría de la evolución apoyada en tres teorías subsidiarias: la selección natural, la herencia y la variación fenotípica. Darwin acertó a pergeñar el cuadro completo a pesar de entender sólo una de ellas, la selección. La Síntesis Moderna combinaba ese conocimiento con los nuevos conceptos adquiridos en su tiempo sobre genética. Pero la Síntesis Moderna ni incorporó ni pudo incorporar conocimiento alguno sobre la generación del fenotipo. La nueva aproximación al estudio de la forma, en el campo de la biología evolutiva del desarrollo (Evo-Devo), ha traído a primer plano la plasticidad del desarrollo y la plasticidad fenotípica, las discordancias genotipo-fenotipo, la determinación de la forma mediante factores físicos y epigenéticos y sistemas de herencia que se extienden más allá del gen. La evolución fenotípica, sabemos ahora, no es siempre gradual, ni todos los rasgos son necesariamente adaptativos. La relación entre variación genética y fenotipo dista mucho de ser simple y directa. Antes al contrario, entre genotipo y fenotipo interviene un complejo aparato de transformación.

Reseñemos, por último, el predicamento que en nuestros días está tomando lo que podríamos llamar "evolutividad" (*evolvability*), en cuyo seno se aborda uno de los supuestos básicos de la teoría contemporánea de la evolución: los organismos complejos pueden surgir de la selección sobre variación genética aleatoria. En su nivel más básico, la evolutividad remite a la capacidad de una especie para evolucionar. Podemos acotar más: capacidad para evolucionar en respuesta a la selección natural. A primera vista, una trivialidad, puesto que todas las especies que existen son resultado de evolución y sus antepasados, por lo menos, gozaron de dicha capacidad. Pero el asunto resulta menos trivial cuando preguntamos si las especies con que contamos ahora no constituyen sólo el producto de la supervivencia del más adaptado (el *fittest*), sino que se trata también del dotado de mayor capacidad de evolucionar. La evolutividad refleja la interacción entre variación genética, variabilidad y selección.

Luis Alonso

EN EL PROXIMO NUMERO DE DICIEMBRE 2010



Genética de la evolución,

por Jonathan Pritchard

La evolución humana reciente habría seguido un camino distinto del que predecían los biólogos.

La escurridiza teoría del todo,

por Stephen Hawking y Leonard Mlodinow

Los físicos vienen buscando desde hace tiempo una teoría final unificadora. Sin embargo, quizá deban acostumbrarse a convivir con varias.





Tratamientos para el autismo,

por Nancy Shute

Ante la falta de soluciones médicas, los padres de niños autistas acuden a terapias alternativas poco fiables y, en ocasiones, arriesgadas.

Hojas artificiales,

por Antonio Regalado

Es posible que el combustible del futuro no proceda ni de cereales ni de algas, sino directamente del Sol.

El calendario chino: la astronomía al servicio del poder,

por Jean-Claude Martzoff

Entre 104 a.C. y 1644 d.C. el calendario chino fue objeto de un sinfín de reformas oficiales, concebidas para hacerlo imprevisible de un año para otro. Sus cálculos, perfectamente racionales, se mantenían en secreto.

